

环境科学基本知识丛书

环境 生物学

林昌善 吴奎明 编著

中国环境科学出版社



18.181
335

环境科学基本知识丛书

环境生物学

林昌善 吴聿明 编著



中科院植物所图书馆



S0017470

中国环境科学出版社

1986

内 容 提 要

本书介绍了环境生物学的基本概念。主要有：生态学基本原理；环境污染物；毒物在生物体内、生态系中循环、迁移规律及其对它们的影响。还介绍了用生物学方法治理环境、以及人类活动对环境的影响及环境保护等。最后还介绍了这一学科的发展趋势。

本书适用于从事环境保护、环境生物学和其他方面的环境科学工作者，也可供有关科技人员及高等院校师生参考。

环 境 生 物 学

林昌善 吴聿明 编著

责任编辑 李静华

中国环境科学出版社 出版

北京右安门外大街201号

北京市建外印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年5月第一版 开本：787×1092 1/32

1986年5月第一次印刷 印张：7 1/2

印数：0001—10,000 字数：168,000

统一书号：13239·0030

定 价：1.60元

出版者的话

保护环境，造福人类，使广大人民群众以及子孙后代有一个良好的生息和工作环境，这是环境保护的根本目的。

为了提高全民族的环境意识，普及环境科学基本知识，本社组织环境科学方面的专家编写了一套《环境科学基本知识》。这套丛书包括：环境化学、环境物理学、环境生物学、环境地学、环境工程学、环境医学六个分册。每个分册对各该学科的基础理论，基本内容和基本知识进行了比较全面的、系统的介绍和阐述。书中附有图表以加深对内容的了解，力求做到深入浅出。

本丛书可供环境保护系统中的中级技术管理人员和各级领导干部阅读，也可供从事环境保护工作的科技人员和大专院校的有关专业的师生参考。

环境科学是一门新兴的边缘学科、它的研究对象、任务、内容和学科体系等都在发展之中，还有许多问题尚待进一步研究和探讨。同时由于我们组织编写这套丛书的时间仓促，经验不足，难免存在某些缺点和错误，热忱地期望广大读者批评、指正。

在组织编写这套丛书过程中，得到许多同志的大力支持与协助，谨致谢意。

中国环境科学出版社

一九八五年十月

前　　言

从学科发展上看，环境生物学是个新兴的、综合性很强的学科，在六十年代初有人把它从生物学中独立出来，到七十年代，这一学科才初具雏型。其内容包括正常和非正常天文、地理、气象、水质、地质等的物理化学环境因子和有生命机体的细胞、个体、种群、生态系统间的相互关系的规律和机理，以及用生物学方法治理被人为干扰、破坏的环境等。因此，它所涉及的学科范围广而杂。

广义地说，人民现实生活中就必须与环境打交道，必须研究环境中所需之物（多为生物体）与环境的关系。工业革命后，在较发达的工业地区就存在有各种环境污染问题，如因废水排放使某些溪流、湖泊成为死河、死湖。十九世纪中叶，有的学者开始研究水污染引起河流、湖泊中的生物区系变化。到1909年，科尔克威茨（Kolkwitz）和莫尔斯松（Morsson）就提出了污水生物学系统。第二次世界大战后，由于工农业生产的飞速发展，使环境污染问题愈益尖锐地摆在人们面前。特别是某些地区的生态环境严重恶化、物种灭绝及人类自身受公害侵扰、威胁日益突出。因此，不能不促使人们关心、注意研究环境受人为干扰后对生物（包括人类自身）作用的基本规律，从而诞生了环境生物学这一学科。环境生物学与生态学、生物学中的许多方面结有不解之缘，有不少共同之处。由于生态学是研究生物同环境间相互关系的学科，所以也有人认为环境生物学就是生态学；有的则把

环境生物学局限于讨论正常环境因子和生物的关系，纯属生物学上生理、生化的研究。

我们认为，从这个学科的形成过程看，环境生物学含有生态学许多基本原理，包括正常生态因子和生物间关系的机理，但着重点是研究受人为干扰后环境与生物间关系的基本规律。它包括人为活动和环境污染后对生物、生态系统的危害和毒理作用，污染物、毒物在生物体、生态系统间循环迁移规律；生物体或生态系统对污染物、有毒物的净化功能；受人为干扰后生态系统稳定性和生态平衡恢复手段的研究以及自然保护、生物监视、评价等方面。它的研究方法如同许多应用学科一样有室内实验、现场调查、生物及生态模拟（包括计算机模拟）等。本书主要介绍：

1. 生态学基本原理；
2. 环境污染物、毒物在生物体内、生态系统中循环迁移规律及对它们的影响和作用；
3. 用生物学方法治理环境污染的基本概念与类型；人类活动对环境影响及环境保护等。

环境生物学是一门新兴学科，它的概念、内容、意义都在讨论形成中，这门学科又是综合性很强的学科。至今，本学科很成型的专著还未见到。我们学识有限，在介绍这一边缘学科中难免有错误与缺点，敬请读者、专家批评和指正。

林昌善 吴聿明

目 录

一 生态系统	(1)
(一) 基本概念和定义	(1)
(二) 生态系统的主要成分	(4)
(三) 生态系统的结构和功能	(6)
(四) 生物群带	(9)
(五) 生态系统的可能研究途径之一	(12)
二 生物圈	(16)
(一) 地球能源和气候	(16)
(二) 水循环	(20)
(三) 地质循环	(22)
(四) 生物地质化学循环	(23)
(五) 水生生态系统	(36)
三 生态系统的生产力、能量消耗和 种群生态学基本概念	(42)
(一) 初级生产力	(42)
(二) 次级生产力	(48)
(三) 分解过程	(56)
(四) 生物种群数量变动主要统计参数	(61)
(五) 种群结构	(65)
(六) 种群数量变动	(67)
(七) 种间关系	(70)
四 环境对生物动态的影响	(73)
(一) 概述	(73)
(二) 利比赫法则, 限制因子概念, 生物和地理分布、	

气候关系	(77)
(三) 温度对生物动态的影响	(83)
(四) 湿度、水、降水、雪、风等与生物动态关系	(90)
(五) 光对生物动态影响	(97)
(六) 环境中某些无机物质对生物的影响	(101)
(七) 土壤、火等环境因子对生物的影响	(107)
(八) 环境与生物间相互作用	(110)
五 环境污染对生物的影响	(117)
(一) 若干化学元素、化合物的一些特性	(117)
(二) 有毒物质、污染物在生态系统中循环与迁移	(121)
(三) 毒物在生物体内转归和作用	(129)
(四) 有毒物质在生物体内转归和作用的实例	(139)
(五) 生物的富集(浓缩)	(147)
(六) 某些毒物、污染物的危害与毒物联合作用对生物的影响	(153)
(七) 物理污染、生物污染对生物的影响	(157)
六 环境污染的生物治理	(167)
(一) 生物对毒物的作用	(167)
(二) 生物监测和指示生物	(168)
(三) 废水的生物学处理	(176)
(四) 污泥和土壤污染的生物治理	(188)
(五) 绿色植物在治理某些环境污染中的作用	(192)
(六) 防治农药污染的动植物生物保护法	(198)
七 人类活动对环境的影响、环境保护和环境改造	(205)
(一) 人类活动对环境的影响	(205)
(二) 自然资源保护和环境改造	(220)
(三) 环境生物学的发展趋势	(227)

一 生 态 系 统

(一) 基本概念和定义

人们把生态学作为研究生物（动物、植物和微生物）和环境相互关系的科学，而“环境”一词又经常被人们用来表示生物生活居住地的物理、化学的生活参数。但是，在自然界里每个物种并不是自己孤立地生活着，而是和其它物种生活在一起，因此除了物理化学环境条件之外，还应包括其它生物。环境生物学的范畴比较广泛，它包括动物学、植物学、微生物学、遗传学、地理学、气象学、水文学和生物化学等学科中的有关部分。

生物和一定的环境构成一个生态学单元。生态学的最终目的是研究一个有生命的系统在一定的环境条件下，如何表现生命的形态和功能。研究这个问题只能用整体观的方法（即了解部分与整体之间的相互关系）。有时人们研究某一种生态现象只限于用一些条件去解释这种现象。比方说，研究土壤动物的环境生物学时，我们联系它们生活的土壤的温度、湿度和酸碱度等因素。但是更重要是从土壤的整体性去考虑，因为它是无机物和有机物的复合体，包括种种理化因素和生物因素，特别是后者之间的相互关系，是通过长期进化过程演变成今天的状态。如果不是这样去理解就容易对自然界和人为环境的变化所产生的生态效应得出错误的认识。

据估计，目前有机界有动植物品种约300~1000万种，

迄今有记载的约有150万种，其中仅有一小部分种类曾经过较详细的生态学研究，而大部分种类还没有被人们仔细地研究。超过三个以上物种的相互关系的研究则很少见，多种间的相互关系还有待生态学家来探索其奥妙。有机界的奥妙只能通过整体性的理解去揭示。这种研究可以从不同结构的水平入手，从大至宇宙、生物圈、生态系统、群落系统；小至种群个体直到细胞。我们可以把个别结构水平都看成一系列“黑箱”，大的黑箱里套小黑箱，一个套一个。每个箱的功能可以用“输入”和“输出”的数量来测定，如果在某一个水平上人们所研究的问题得不到解决，那么就应在该水平上揭示其内部各亚系统（“小黑箱”）的相互作用。反过来人们也可以把“黑箱”作为高一级系统的相互作用的亚部分。我们将用这种观点来阐述。

在浩瀚无垠的宇宙中，同人类发生最密切关系的应是人类自己居住的星球——地球。地球上的资源是有限的，而物质在地球上不断循环，基本上既没有损失也没有添加任何新的物质。能量从太阳辐射到地球，又以相类似方式反射回空间。地球实际上是一个闭锁系统，人们可以从物质的循环和能量的转换来研究在地球上有机体的活动规律。

在地球表面大气圈范围内，我们可以看到它是由若干层次所组成。生命系统最高一层次就是生物圈——它就是地球表面上有机物生活和繁殖的地带。在生物圈有所谓物理化学环境，即固体的岩石圈、液体的水文圈和气体的大气圈。地球上许多元素通过种种不同渠道将非生命物质送进有机体中去，使有机体得到生长和生存，最后有机体又通过排泄和分解作用将物质返回到外界的物质库中去。这种物质反复流动称为物质循环。

自养生物（绿色植物）的光合作用把太阳能固定在植物体的化学键上，然后又由植物本身的代谢作用把键上的能以热能的形式释放出来。而异养生物（动物、真菌、某些细菌等）则依赖自养生物所提供的物质和能量而生活（参看图1-1、1-2）。

生态系统可以说明地球上支配物质流动和能量转换的原理。它出现在地球上已经有几十亿年历史。地球上无论在陆地或水域，干燥或潮湿地区，寒冷或炎热地带都有各式各样的生态系统。动植物和微生物种类千变万化，各自适应于各种气候和地质条件。有些生态系很丰富，充满活力；有些是贫乏而衰老；有些是新生的，在变化和生长中，有些则处于稳定状态。

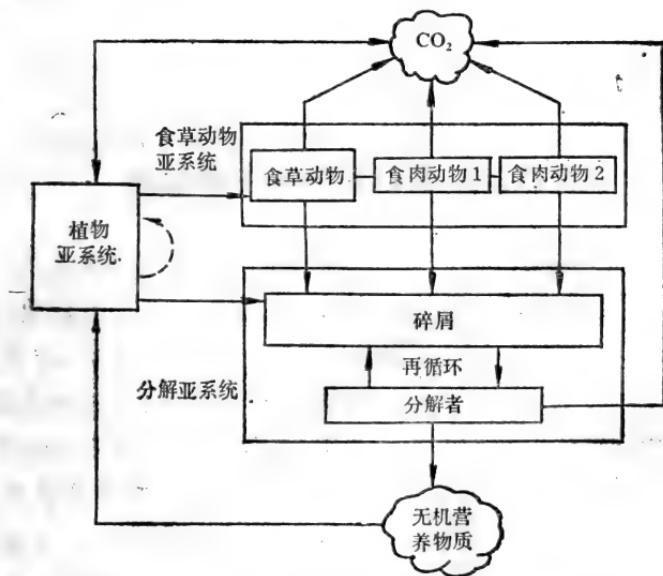


图1-1 生态系统的一般模型
[三个亚系统(植物、食草动物和分解者)及其间的相互关系]

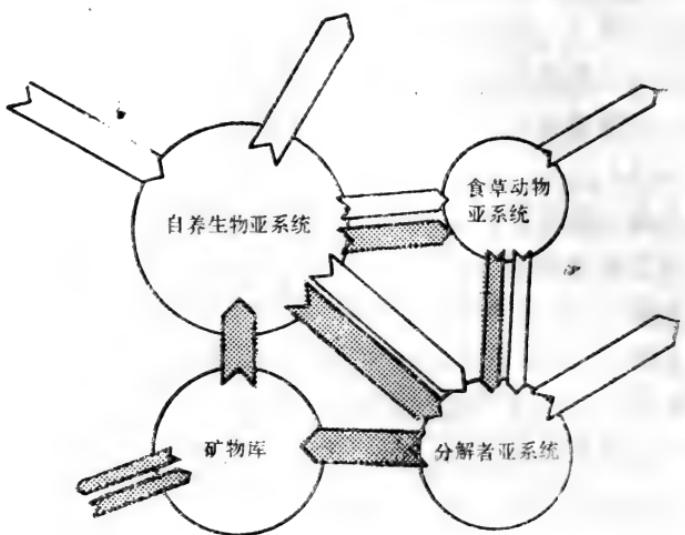


图1-2 生态系统主要成员间关系和营养物质循环（黑色箭头）

（二）生态系统的的主要成分

一个生态系统在一定范围内可以分成三个亚系统：1. 自养生物亚系统（即绿色植物）。它的主要任务就是接受来自太阳辐射的能量和吸收来自土壤、水和空气中的营养物质，通过光合作用合成为植物的组织。由自养生物合成的物质和能量统称为总初级生产力（GPP）。一部分的GPP被植物的呼吸作用（R）所消耗，剩余的部分称为净初级生产力（NPP）。即 $NPP = GPP - R$ 。2. 食草动物亚系统。它包括一切食草动物和它们的捕食者。食草动物主要以植物为主，它的捕食者又以食草动物为主。甚至在捕食者之上还有它的捕食者，形成一联串的不同营养层的异养生物，这些异养生物连

同分解者的产物统称为次级生产者。3. 分解者亚系统。它包括一些分解动物和植物的死尸和碎屑的生物与它的捕食者。它们是一些真菌、细菌和低等动物，它们把死的有机物质逐步还原为能够被吸收的营养物质，再回到土壤或水域中去。最终这些营养物质又被植物所吸收（参看图1-1、1-2、1-3）。

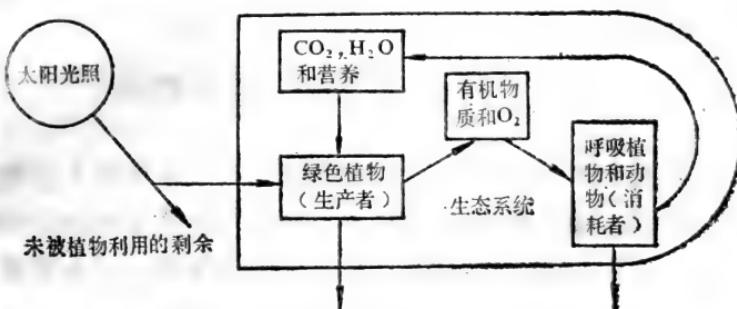


图1-3 生态系统中生产者和消费者之间的能流模型

从生态学的观点看，把营养物质区分为三种不同的库是有用的。1. 交换物质的交换库；2. 相对地不利用物质的储存库；3. 可利用物质的利用库。生态系统的重要特点是在这个系统的范围内，能量以太阳光形式进入该系统而以代谢热形式输出，同时，系统内营养物质从库中被调用，重新循环不止。

我们经常把这三个亚系统所有种类的会聚或一个亚系统的一切种类的会聚称为群落。一个群落的范围大小有时很难区分，这就看一个系统中的各群落分界的连续性。具体的植物群落和动物群落界限更难确定。尽管如此，人们仍然可以从功能上给予群落一个明确的定义，以测定其总活动以及各群落间的相互作用。

我们可以看到生态系统是由许多动物和植物种群所组

成。一旦种群的定义明确下来，那么人们就有可能通过能量或营养的输入和输出，迁入或迁出推断出它的动态或对于外界干扰的反应。影响这些参数的最主要因素是其它生物（竞争者，捕食者和寄生物）和非生物环境，特别是天气条件（短期的温度、风和降雨条件）和气候条件（这些条件长期的平均值）。

（三）生态系统的结构与功能

分析生态系统时，首先需要把该系统的界限予以规定。有的时候这种界限比较明确，但在植被有梯度性的分布时，确定这种界限就比较困难。因此，这种界限的划分带有一定的主观性。在“国际生物学研究规划”（International Biological Programme）中有一个传统的规定，把一个陆生的生物群落划出一个典型的研究区。在该区内作无损害性的种种测定，如测定该区内的温度、雨量和二氧化碳含量等等。在试验区的四周划出一条狭窄的保护带。在这保护带之外又划出 1 ~ 10 英亩（1 英亩 = 4064.86 米²）作为植被或土壤取样地，或划出较大的地区作为研究哺乳类动物或鸟类之用。

从生态系统的分界来说，可以看到，一个生态系是一个在生产力和营养物质交流上能自足的地区，也就是说流出分界以外的物质交流比在内部的交流要小得多。就这一点意义上说，湖泊或海洋也都可以认为是一个生态系统。流水系统中营养交流较为彻底全面，但内部生产和物质循环则较少。因此，河流或小溪可以看作开放的生态系统，严格地说，是一个复杂系统中的亚系统。最早的生态学家把生态系统的主要成分按其广泛的营养阶层分成植物、食

植物动物和食肉动物。这三大类生物按其数量来区别，植物数量最多，食植动物次之，而食肉动物数量最少。排列起来，植物在底层，数量最大；食植动物在中层，数量较少；食肉动物在最上层，数量最少。看起来好象古埃及的金字塔，叫做数量金字塔。实际上它们之间的生物量按重量来比较也同样有重、中、轻之别，排列起来也类似金字塔。叫做重量金字塔。见图1-4。例如一个草原，单位面积上的牧草无论在数量和重量上都居多，啮齿动物居中，狐狸居少。生态学家林德曼（R. Lindeman）又进一步提出这三类生物营养层之间存在着“营养阶层的动态”概念。也就是说它们之间能量和物质的转换与交流都存在着数量变动关系。这概念提出之后大大促进了当代生态系统中数量分析方面的研究，同时也表明人们对生态系统更深刻的理解。

一个生态系统的一般模型是由三个亚系统组成：植物、食草动物和分解者及它们的主要分室或营养层。一个生态系统的功能可以按能量流和物质（营养）流进行描述。但是二者的分析各有各的优点。生态系统的能量在不同系统内、不同营养水平的植物和动物之间的相互关系，可以通过一种能量单位（焦耳或卡）进行比较。在许多情况下，矿物营养物质的多寡限定了一个系统功能的作用，因此，分析营养流的途径可能更有意义。一个系统中的营养物质的收支平衡说明一个系统的完整性，同时也说明亚系统分界处的反馈作用在调节和维持功能的完整性中所能起的作用。

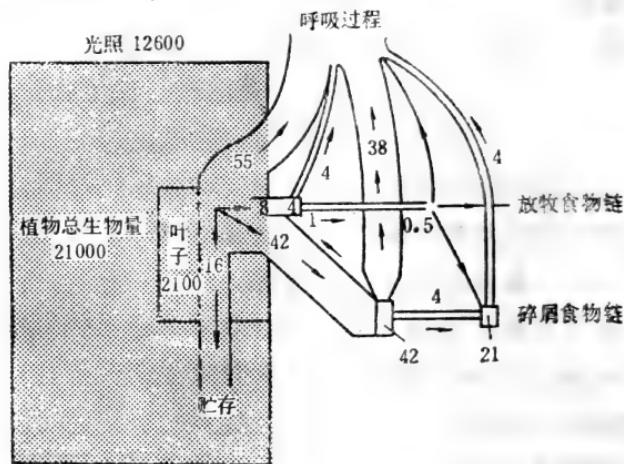
目前，完整的能量流的分析研究并不多，现在仅以经典例子来说明研究结果。

图1-4A说明一个森林系统中，植物储存有大量的能量，要维持这样大量的能源并不需要大量能耗，因为森林的木质

部在代谢上属于惰性物质，而草食动物的生物量是小量的，大量的能流是通过营养生物和分解生物的活动、呼吸来完成。

相反地，图1-4B说明海湾浮游群落生态中自养生物的生物量是微量的，维持了更大的食浮游植物的生物的亚系统。这就出现与前述的生物量金字塔相反的所谓倒置的生物量金字塔式的浮游群落的特殊情况。

A 森林生态系统



B 海湾生态系统

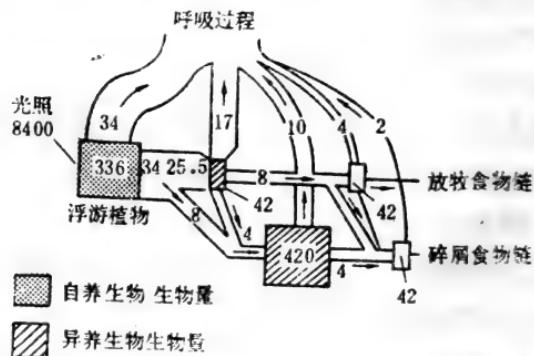


图1-4 两个生态系统类型(A和B)的能量比较(图中生物量的能量单位:焦耳/米², 能流速度单位: 焦耳/米²·天。箭头后数字是能流速度。Odum, 1962)

从上述结果我们总结如下三个要点：

1. 在陆地生态系统中净初级生产量的一部分储存在多年生的植株的组织中，构成它的主要生物量。尚未成年的森林或植被的生物量可以达到成年的森林或植被的净初级生产量的20~60%。

2. 陆生净初级生产量中的一小部分被食草动物所消耗，即使在过度放牧的草场，这部分也很少超过净初级生产量的25%。虽然地面上一半的生物量全被啃食，但地下生物量（即根部）的产量可能等于地面部分，甚至超过地面的生物量。在森林系统中，昆虫或食植动物消耗的初级生产量不大于10%，而在水域生态系中，浮游植物生产量的80%或超过80%有可能被食植浮游动物所消耗。

3. 不被分配到植物生长的那一部分物质或不进入食植动物的亚系统中去的物质连同食植动物和捕食动物的死尸，以及它们的排泄物统统都进入分解者亚系统。在成熟的森林系统中，植株不再继续累积生物量，大部分的净初级生产量以落叶形式构成落叶层再经分解者进行分解过程。分解者主要的成员是真菌和细菌。除此之外，取食碎屑、真菌和细菌的动物，以及它们的捕食者都属于这种群落的主要成员。物质就这样在他们之间循环，直到有的物质矿物化为止。

(四) 生物群带

陆地表面生物的丰盛度和分布主要决定于该地区的气候条件（其中温度和雨量最为重要），而在水域里，光和营养这两个因素更为重要。在生物圈里，我们能识别不同的地区具有由典型的气候或其他物理条件等所决定的特殊的动植物

区系。这些特定的生物相人们称它为生物群带。在图1-5中，人们可以看到陆生生物群带与地区的气候条件的一般关系。在雨量充足的地带，森林占主要成分。从赤道向北部寒冷地区，随年平均温度的降低，森林成分逐渐减少。在同一地区，雨量较少的条件下，森林让位给草原，在雨量极少的条件下，荒漠或半荒漠群带出现在热带、温带或亚极地带。这三种主要类型生物群带（森林、草原和荒漠）都按本地区的土壤和温度的情况，出现各种不同的荒漠、草原和矮小灌木植被，最后向北出现冻原植被，这里没有森林，只有矮草、苔茅、苔藓、地衣和矮小灌木，北欧的麋鹿，北美的麝香牛和旅鼠类都是这里一些典型的食草动物，同时在夏季到来时，大量鸟类迁徙到冻原地带繁殖。虽然夏季短暂，但白天光照时数增多，有利于昆虫的生长，所以昆虫数量还是可观的。

针叶林带（或称为泰加林）跨过欧亚和北美广阔地带，北以冻原为界，南以混交林为界。这里北部的林带常见的植物有枞松等常青针叶植物。它们是一些耐寒植物，在温度零度以上都能进行光合作用。常青树松脂的成分对多数昆虫和脊椎食植动物产生有害作用。麋、雪兔和鸟类常常出现在林缘和湖泊地区，在那里，它们可以找到杂草和落叶灌木植物为生。山猫、狼、狐狸、猛禽都是这里的主要捕食动物。

在温带地区我们可以区别两种生物群带。一种称为温带落叶林带，出现在西欧、美国东部、中国、日本和南美洲、澳大利亚和非洲部分地区。这里阔叶林如橡树、山毛榉和枫树等是主要的树种。冬季较冷，夏季温暖潮湿，生长季节长，很少出现长期干旱，因此昆虫、鸟类和哺乳动物种类繁多。大型哺乳动物，如山羊、松鼠、熊、狐狸、山猫和美洲豹经常出没于林间。另一种称为温带草原生物群带，它出现在

具有干燥的夏季和寒冷的冬季。由于夏季干燥、土壤缺乏水分，不利于森林生长，除个别滨湖或水际地区才出现少量森林。大型的哺乳类除北美的野牛外，与热带的萨王那地区的种类相比则差多了。但小型的啮齿动物如野鼠、小鼠和松鼠是普通的食草动物。

澳大利亚、南美洲和非洲的萨王那地区，每年夏季长期干旱，土壤缺乏水分达五个月之久，构成了典型的热带草原，具有稀疏的森林。非洲的萨王那地区具有世界上最多类型的动物种类。

热带森林的范围分布在西非、马来西亚、缅甸、印度尼西亚和澳大利亚东部和北部的一大片热带地区，它的北面分布界具有明显季节性的短期干燥气候。热带林则出现在终年有充沛的雨量地区，温度的季节性变动并不大，森林高大，有的可超过50米高度。许多种类树木茎部膨大，树上攀沿许多附生植物，同时由于树冠高大，阳光很难深入照射，因此地面植被稀少，这里的动植物种类繁多，哺乳动物除猿猴类外较为贫乏，主要为攀树种类，鸟类、爬行动物昆虫（特别是白蚂蚁）较常见（见图1-5）。

生物和环境之间的关系，无论是生物的或非生物的，在进化过程中最终都达到动态平衡状态，即地球上的生地化的循环。在物理化学过程中也有类似的倾向性。这种现象的调节机制一般被统称为“自我调节”机制，它在平衡点上通过负反馈圈和正反馈圈的作用来调节其偏离。一个最简单的模型足以说明动物种群数量的调节机制（见图1-6）。在自然界，动物数量经常在平衡点上下颤动。一个具有正反馈作用占优势时，种群数量增大，呈指数增长，直至资源受到限制时，种群数量开始递减。反之强烈的负反馈起作用时，将使种

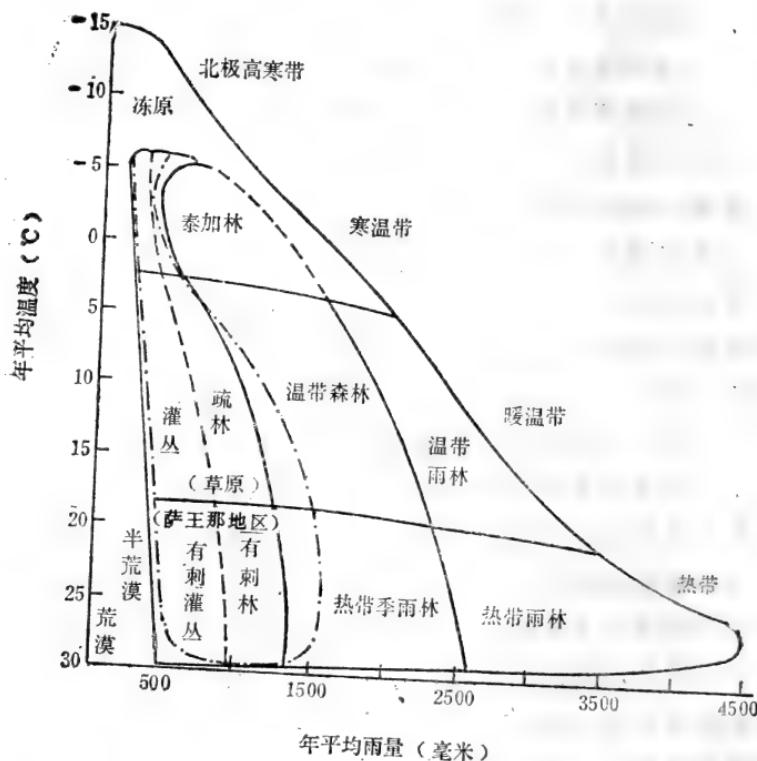


图1-5 按温度和雨量划分的世界生物群带图解(Whittaker, 1975)

群下降至绝灭。一个完善的密度制约的机制需要有敏感调节器，每当状况略有偏离时，其正反馈和负反馈立即起反应，将其调节到平衡状态。就时间上说，一个生态系统很难或很少达到由环境决定的平衡点。这是因为环境的调节机制非常复杂，而且还有时滞的作用。

(五) 生态系统的可能研究途径之一

陆地野外生物群落经常要包括若干生态系统类型，它们

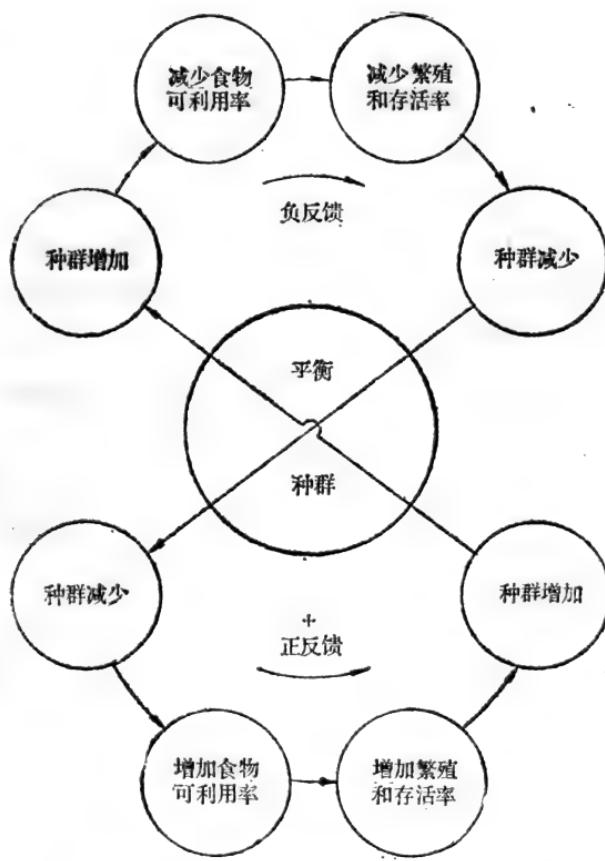


图1-6 “一个自我调节机制”的理论模型

(这种调节机制使种群数量保持在稳定的平衡点附近。Anderson, 1981)

之间分类并不严格，这就给研究带来不便。特别是遇到相邻系统间有营养物质联系，如营养物质从陆地往水域流动。象这类问题人们有理由把一个下游区的溪涧或湖泊作为一个生态单元。在试验的设计中，在分水岭处接上一个U型凹口堰，水流经这凹口堰的容量以及物质含量都可以一一预先测定。这样就可不必事先照顾各系统间的相互作用及其成分。

当然还必须对所得资料进行分析以解释自然系统的功能以及受到外界干扰后的反应。

可惜，关于这种设计的研究并不多，目前只有美国新罕布尔的胡巴地（Hubbard）山溪森林试验站研究得最为完整，而且深入。他们在山谷区里选择一块落叶森林（海拔为229~1015米），其间有不少小溪在山谷间流入下游区。他们将流过堰口的水量、雨量及其营养质量分别记录，并总结一年内净出入帐（参阅表1-1）。

表1-1 胡巴地山溪分水岭的营养物质收支表
(数值以每年,每公顷100克计)

元素	雨量(输入)	溪水(输出)	有森林的分水岭差额(净输出)	砍伐了森林的分水岭差额(净输出)
钙	2.6	11.7	9.1	77.9
钠	1.5	6.8	5.3	15.4
镁	0.7	2.8	2.1	15.6
钾	1.1	1.7	0.6	30.6
NH ₄ ⁺	2.1	0.3	-1.8	1.6
NO ₃ ⁻	3.7	2.0	-1.7	114.0
硫	12.7	16.2	3.5	2.8
硅	微量	16.4	16.4	30.0
铝	微量	1.8	1.8	20.7

他们研究的结果，显示钙、钠、镁、钾、硅和铝流出水中的含量比输入的量为多。这说明系统内有这些元素的来源，它们来自山上的基岩和矿物质（花岗岩和冰川的沉积物）。流出的矿物量相当于如果所测区域中全是石头，则表层每年约有0.04毫米被风化流失。特别在山坡上没有森林护土作用时则更为严重。遇到降雨季节时，这现象更为突出。值得特别指出的是每年降雨量为1246毫米/米²，而流出量只

有799毫米/米²，相差447毫米，显示出森林系统的蒸腾量和地下径流量相当大。

山谷雨水和雪水的pH值经常处于4.0以下，硝酸盐浓度高达 0.14×10^{-3} 摩尔/升，仅这两项数据足以暗示该山区可能受工业污染。据估计，50%输入硫有可能来源于矿物燃料的燃烧。这种“酸雨”现象引起广泛的关注，下雨将加剧叶面营养物质的淋溶，淋溶水对于有些植物特别是针叶林是有毒的，并且它加速了土壤中营养物质的流失。因为泥土、矿物质是带负电荷的，其表面上可吸收正电荷。“酸雨”中的H⁺有可能与这些正电荷交换从而加速系统中的矿物质的流失。

在表中我们可以看到无机氮素同其它营养元素不同，它的流入比流出大。氮的来源可能通过固氮作用加到系统中去，或相反地它通过反硝化作用而从系统中消失。但是我们已经知道，在循环中，氮的主要部分构成了植物的生物量，因此通过分界处的氮量同内部营养物质的分量比较起来就无足轻重了。

二 生 物 圈

(一) 地球能源和气候

一切生命活动都依赖于能量、水分和营养物质的供应，否则一切生命活动都要停止。从生物圈的水平来说，这些必需品的分布与丰盛度受来自太阳辐射过程、地壳表面的水文圈和地质圈所制约。因此，我们首先应该把这些非生物过程给予适当描述，然后考虑生物圈各物理、化学、生物环境之间的相互关系才更有意义。

地球以 23.5° 倾斜于垂直轴顺椭圆轨道绕太阳运行。这种有一定倾斜度的运转，产生从极圈到赤道极显著的太阳辐射接受面的梯度差。地球的北半球，在仲夏的夏至季节，北极圈以北全部地面向太阳，因而接受24小时的光照。但是辐射的强度比赤道弱。相反，地球的南半球，夏至出现在一年的十二月份，此时北半球正值冬季，同时北极圈正处于24小时的无日照时刻。当地球按主轴自转，在春分和秋分时节（三月和九月），两极圈出现不同程度的微光，而在温带和赤道地区，白日和夜晚的时数几乎相等（见图2-1）。我们可以看到，达到大气外缘的太阳能的多少是随着纬度变化而变化。在进入地球大气圈后，这些能量将会以不同方式反射或辐射回去。如被云彩、大气尘粒、地面等所反射或辐射回宇宙空间。

土地和水域吸收能量的相当大部分将通过水分的蒸发而进入大气，当这些湿气凝聚时，其潜热将使大气加热。

为了进一步理解达到大地的太阳辐射的转换作用，我们

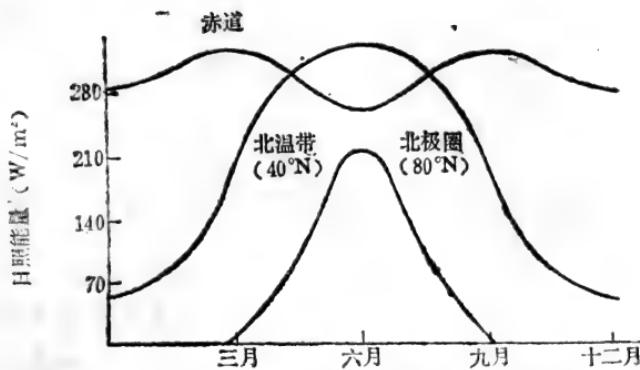


图2-1 北半球热带、温带及北极圈的日照能量的年变动情况 (Mumney, 1970)

还必须考虑到它的电磁波谱 (见图2-2) 大部分的太阳能是以0.2~4.0微米波长的电磁波向外辐射的。其中可见光部分 (400~710毫微米) 约占41%的能量，红外光 (710~3000毫微米) 约占50%，其余约9%为紫外光 (400~80毫微米)。可见光的大部分，连同多数的红外光和一部分紫外光可达到大地。另一些红外光被大气的尘埃、二氧化碳、蒸气所吸收。对于波长短于0.3微米的紫外光，它在生物学上有很大的意义，因为它含有很高的能量，能破坏生物组织中有机分子的键。但有幸得很，在地球上层的大气层里存在着臭氧层 (O_3)，它在30公里高空中把短波的紫外光给吸收掉。因此人们称它为臭氧屏蔽，起过滤短波的作用，让可见光通过这个光学窗口达到地表面。早期的地球表面曾处于强烈的短波冲击中，因为氧气不足，使臭氧层难以形成。随着绿色植物的出现，通过它们的光合作用，使大气层氧的含量达到目前的程度，这说明生物曾对物理环境起着改变的作用。

辐射到地球的太阳能只有一半到达地表，另一半被大气

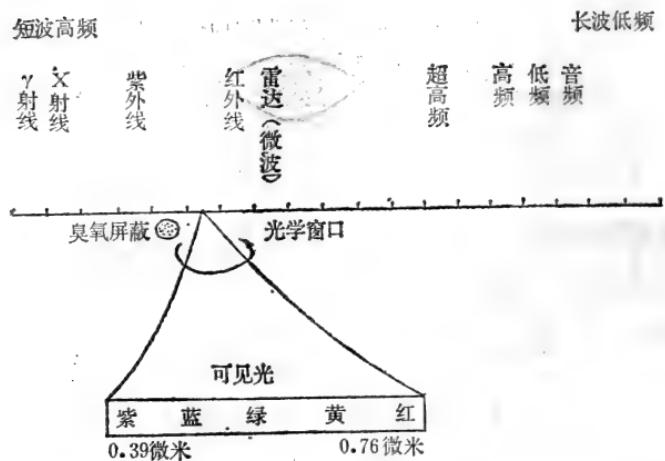


图 2-2 电磁波谱示意图

中各种物质吸收、反射回空间或从地表反射回空间。大多数的太阳能都是以可见光的形式达到地球表面，相当部分是以热的形式反射回空间，而地球大气层又不让辐射能透过，使大部分热散失暂时受阻，这现象好象暖房的玻璃屋顶，起着维持相当高温的作用，因此人们称它为“暖房效应”。总之，太阳辐射的短波光被阻挡，而只有长波被利用来维持生命。

地球仅接受来自太阳50%的辐射能，由于地球是椭圆形（并为大气圈所包围）因而各地区所接受的能量是不均匀的。地球表面所接受的太阳能多少，首先决定于太阳入射角度，在赤道地区的大部分时间中，太阳入射角近似于 90° 角。因而比在极地同样单位面积所接受的能量多。同时太阳能辐射到达极地需通过比到达赤道更多的大气，从而更多的太阳能被吸收或反射回空间。因此极地比热带地区要寒冷得多。这种复杂的大气圈、岩石圈和水文圈能量收入的不平衡性，

构成全球复杂的气候类型和冷热不均的物理现象。这种现象产生大气中大规模的气团运动。在热带受热较多的地区，其地表受热多，形成了大气中的对流。上升气流越上升越变冷，其中水分逐步凝聚，下降为雨，形成了典型的潮湿天气。在极地，冷空气随海拔降低而下垂，然后在地面上向赤道移动，并在南北纬 30° 附近下沉。〔由地球自转所产生的科里奥里（Coriolis）力使地表产生地面风，在北半球风向偏右，南半球风向偏左，形成所谓南北半球的贸易风。〕其下沉大气含水分少而干燥，在这些纬度（北非、南非、澳大利亚及南美洲）雨量很少，天气晴朗而高温。而暖和气团向极地移动时接受来自大陆和海洋的潮湿水分。当暖和空气与来自极地的冷空气相遇时，潮湿空气随即下降为雨，形成温带的降雨带。

这种基本气候类型随季节、地球和太阳相对位置和地貌、高山等条件差别而在不同地点有所变化。当空气向山巔爬上时，空气冷却，湿的空气则形成雨或雪。

地球大范围的空气循环与地球的能量收支联系起来，它同时又给全球有毒或无毒物质的扩散创造了有利条件。例如空气中的微粒，如灰尘、细菌、花粉、种子和昆虫等都会被带到很远的地方。核武器试验时，所释放的裂变产物——锶⁹⁰就是有害颗粒在全球范围内远距离输送的一个例子。据研究，在中纬度地区，空中的放射性物质只要15～25天就可以输送到全球各地，借助下雨或降雪就能把放射性微粒带回到地面上去。又如，各地农业使用的DDT以蒸气形式吸附在尘埃上被贸易风携带到5000公里之外。在南极的企鹅和北极的爱斯基摩人体内已经测出大量农药残留物。有证据说明，大气中还有许多农药正在扩散，等候时机下降到地球表

面。由此可见，污染问题并不是局部的问题，而是一个带有全球性质的问题。

污染物可由大气的移动而被带到极远的地方。污染物也可以在某些地区的空中集聚起来，由少量逐步增多，直达到有害程度。这是由地区的地理条件引起的。温度递增是大气状态之一，它是由于温暖的气层压在较冷的气层上面，好象一层严密的地毯盖在上面，使污染物无法上升而压在下面。人们生活在这种强逆温条件下就身受其害。

(二) 水循环

水循环是地球上的大循环之一。它对生命的存在是至关重要的。生物的活动是一刻也离不开水。生物的大部分活组织是由水和其他物质组成的，水是体内各种化学过程的介质。许多物质都能在水中溶解，因而水给生物带来大多数重要营养物质。同时体内的代谢废物也是由水（尿和汗液）排出体外的。

地球表面的水文圈包括因太阳辐射而产生的陆地水分蒸发和海洋水分蒸发、大气中水从一地到另一地的转运、水气凝结为雨水或降雪等，同时也还包括从大陆向海洋的径流部分。生物圈要求全球的蒸腾量与降水量相等，地球上约95%的水以化学方式与岩石相结合，不进入循环圈中去，其中只有极少部分由火山喷发出来，见图2-3。

据统计，海洋年平均蒸发量为1200毫米/年·米²，超出降雨量（1000毫米/年·米²），而在大陆上每年为710毫米/米²的降雨量却超出蒸发量240毫米/米²，因此在海洋与大陆之间存在着由海洋向大陆输送水蒸气，而大陆向海洋输送河川的

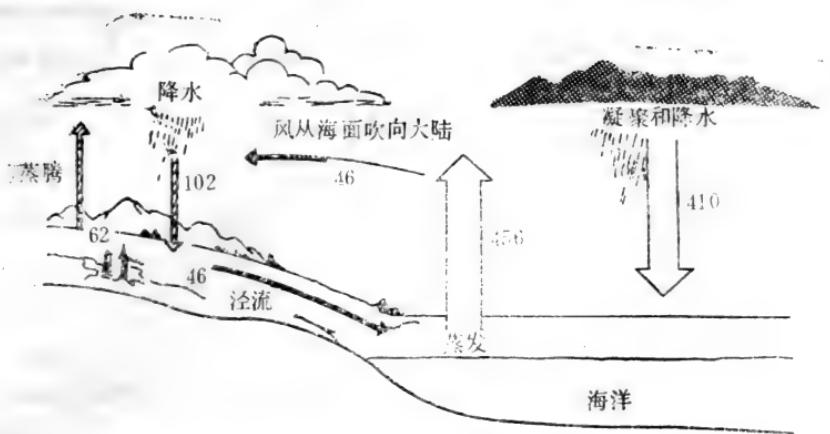


图2-3 水文圈中水循环示意图

(每年流动量约为 10^{12} 吨级, 图中数字为各部分分配比例数。)

径流(见图2-3)。实际上地球的自由水绝大部分都存在海洋和两极的冰盖中,而大气中只有极少部分(仅占0.7%)。水在大气中的周转时间很短,只需9天上下,水在土壤地面可停留几星期到一年时间,在海洋却需要120~3000年。地球上各洲的降雨量和蒸发量的收支是不平衡的(见表2-1)。各地区为工业、农业或家庭用水的供应量有很大的差别,即使在一个国家中,如我国南方多水,北部干旱,分布也是不平衡的。

水循环对生物的生活有很大意义。在循环水中携带有大量溶解的矿物质。有人估计每年有 2.73×10^9 吨的矿物质由河流从大陆往海里输送;同时还有 9.3×10^9 吨的大小不同的悬浮物也掺和在一起向海洋流去。在这大流动中,对生物生长和消亡起着重要作用。

表 2-1 世界各洲的水分平衡表

洲 别	降 雨 量 (毫米/年)	蒸 发 量 (毫米/年)	流 量 (毫米/年)	量 (10 ⁷ 吨/年)
非 洲	690	430	260	7700
亚 洲 (包括苏联)	600	310	290	3000
澳 大 利 亚	470	412	50	380
欧 洲	640	390	250	2200
北 美 洲	660	320	340	8100
南 美 洲	1630	700	930	16600

(三) 地质循环

一切对生物有用的元素都要借助于水循环、地质循环和生态循环，沿着错综复杂的道路循环于大气、陆地和海洋中。暴露在地球表面的岩石经过风霜雨雪的风化过程而逐步被溶化。被溶化的颗粒和溶解的物质基本上由高处向低处流动，经过很长的时间，物质逐步在湖泊、江河和海洋沉积起来形成沉积物。这些沉积物经过高温和高压的作用，以及物理化学的变化，最终形成为沉积岩石。由贝壳灰层或二氧化碳沉积的碳酸盐和沉积物化合形成石灰岩。在极端的地质条件下，如地块的崛起产生大量的热量和压力，使岩石进一步变化成变成岩，其中包括岩石和云石。沉积岩和变成岩再进一步固化成地壳中最常见的火成岩。地壳的岩浆固体化成花岗岩和玄武岩，其中包括海底含铁多的化合物。地块上升、造山运动和火山爆发等长期地质进化过程，需要很长的年代，少则千万年，长则达亿万年。在长期地质年代里，在深海埋

存沉淀的矿物质，在循环过程中回到生物界。上述主要过程可由图2-4表达。

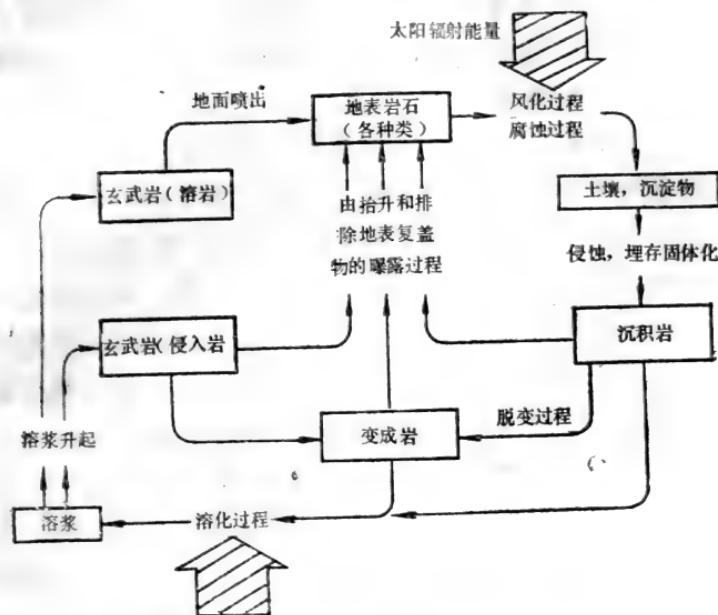


图2-4 地质循环过程示意图(Ehrlich, 1977)

(四) 生物地质化学循环

据估计，生物圈是由约 1.8×10^{12} 吨的活物质组成。这种数量巨大的物质与地球的大小比较起来只不过地球表面一个薄薄的膜，好象苹果的果皮。在这层薄膜的生物圈里有各种各样的生物生活着。无论哪一种生物生活在生物圈里，它们的生活必需品都是类似的。这些必需品就是为了组织合成或维持代谢能量的营养物质。

活有机体所需求的元素约有30~40种，其中主要类别和

它们的功能见表2-2。这些元素在气圈、岩石圈及水文圈的分布和数量是决定生命系统的结构和功能的主要因素。

碳、氢、氧元素是最主要的，它们以液体或固体形式构成了生物的主要物质。它们的干物质在植物体内是 CH_2O 的聚合物，主要是纤维素。

表中的大型营养物质氮素是生物圈里第四位多元素。气圈是氮素的主要储存库，但是它却是不活泼的元素。动物和大多数植物最终都要依靠固氮微生物为它们提供氮素，作为异养生物依靠自养生物提供能源的唯一手段。表中其它大型营养元素（硫等部分元素除外）都涉及沉淀循环。岩石的年代和构成决定了土壤中各元素的成分和数量。例如磷在岩石圈中就很少，而且多数土壤中的磷不能被植物用上。

最后一类为小型营养物或称微量元素，虽然需要量不多，但是缺少或不足时对动、植物都会产生不良影响。许多生物都需有其特殊的微量元素。例如在有些地区的土壤中因缺少钼而使细菌的固氮作用受到限制。许多微量元素对工业、矿产很重要，但由于人类开发使环境中的该元素超过正常含量时，会引起不良影响。至于重金属汞、铅在某种程度上其生物活性很强，一般对生命过程起了抑制作用。表2-2中所举的元素都各有其典型的生物地质化学的循环，这些重要元素在大气圈、水文圈、岩石圈和生物圈中能有效地运转和循环而反复被利用。这说明了生物地球化学循环的重要特征——生物和非生物的成分是紧密联系在一起的。一切营养元素的循环是由环境到有机体，再从有机体又回到环境，它必须在有机体的参预下进行，除了动植物外，特别需要微生物的参加。不仅如此，它的循环过程必需有“地质贮存库”（大气圈和岩石圈）和各种复杂的化学变化。

表 2-2 生命必需的元素及其功能

类 别	元 素	功 能
主要成分 (20~60原子百分率)	氢 (H) 碳 (C) 氧 (O)	细胞、有机化合物普遍需要的元素
大型营养物 (0.02~2原子百分率)	氮 (N) 钠 (Na) 锰 (Mn) 磷 (P) 硫 (S) 氯 (Cl) 钾 (K) 钙 (Ca)	蛋白质和氨基酸的必要成分 神经活动的势能的抗离子 许多酶的辅助因素，例如叶绿素 能量转换作用及核酸都普遍需要 蛋白质及其它重要物质构造都需要 主要阴离子之一 涉及神经传递及肌肉收缩等的主要抗离子 酶的主要辅助因素，膜的主要成分及膜活动的调节
小型营养物 (微量元素) (小于0.001原子百分率)	硼 (B) 硅 (Si) 钒 (V) 镁 (Mg) 铁 (Fe) 钴 (Co) 砷 (As) 铜 (Cu) 钼 (Mo) 碘 (I)	在植物体上极为重要，可能作为酶的辅助因素 在低等生物中最丰富，例如硅藻 存在某些低等动物的呼吸色素中 许多酶的辅助因素 许多氧化酶的辅助因素，例如血红素 维生素 B ₁₂ 成分，固氮作用所必需的元素 许多酶的辅助因素，例如胰岛素 许多氧化酶的辅助因素 具有酶的辅助因素，特别是氮化酶(固氮作用) 甲状腺的成分，调节脊椎动物的生长与发育

生物地球化学循环可以归结为两个主要基本形式：1、气态营养物的循环——营养物集存库是大气圈，在比较快速运转过程中，营养元素的损失较微或没有。典型的气态循环有碳循环、氧循环和氮循环；2、沉淀营养物循环——营养物的贮存库是沉积岩，循环的速度是极为缓慢的，一般以地质年代来估算，但是它对生物有较大的限制作用，为了使这些元素进入有机体（如植物），这些岩石必须经过长期的风化作用，最后变成土壤，在这些变化过程中，大多数元素被淋溶而消失，并且最终作为沉积物而归于大海，沉积于海中，当元素被抬升（如火山爆发或造山运动）后，再经过风化作用才有机会被有机体所利用。沉积的营养物有可能比气态营养物更感严重不足。它的典型循环有磷和硫的循环。

1 磷的循环

磷的循环是典型的沉积营养物循环。磷的主要贮藏库是沉积岩。沉积岩经风化后只有很少一部分的磷参加到基本循环中去。此元素的循环主要是以固态进行的，因而进行的速度极为缓慢，它作为沉积中的无机磷化物形式存在。

磷元素对生物是必不可少的营养物质，它是遗传分子DNA（脱氧核糖核酸）和RNA（核糖核酸）重要的组成成分，也是产生能量物质ATP（三磷酸腺苷）的主要组成成分。虽然它的需要量只不过氮需要量的10%，但它对植物的生长经常成为主要限制因素。植物的根部从土壤中吸取溶解的磷酸盐进入植物细胞内，并组成复杂的分子。而动物又从植物体中取得它需要的磷。当动植物死亡或排泄废物时，死亡的有机化合物就被磷酸盐细菌分解为无机的可溶性磷酸

盐，还有一部分的磷被淋刷到海洋中去形成沉淀物，它的成岩过程需要 $10^8\sim 10^9$ 年，沉积岩中的平均磷浓度比火成岩中的磷浓度低。

提供植物吸收的磷是以无机磷酸盐 (PO_4^{3-}) 形式出现，它是通过岩石的风化或有机物质分解而释放出来的。在有机界，尽管磷元素很有效地被循环或利用，但是在每个生物循环中总有一部分的元素沉积到贮藏库中去。有时土壤中的磷酸盐是如此紧密地同铁、铝、钙或沙粒结合成复杂的化合物，以致难于被植物所吸收。水域里由于铁、铝、钙的浓度不高，所以象土壤中的磷化学冻结现象并不出现。近来，由工业发展，大量工业废弃物和洗涤剂被排放到水域中，引起植物过度生长（富营养现象）。特别是单细胞藻类，发生藻类的“爆花”。藻类继续生长直至元素用尽为止，此时对其他生物就成为限制因素，生态系统有可能不能恢复其原始群落结构。大家都承认，在多数水域生态系统中，磷元素是引起富营养现象的主要因素。

生物作用引起磷的周转率在淡水湖泊的表面上可能只要十来分钟，而在海洋上可能需要几小时，而在土壤里周转率就慢得多，有人估计约二百年左右。

在自然界，磷是由岩石圈被转移到水圈，它是以结合、束缚在矿物微粒里的形式，而不是以可溶形式运转着。因此，陆地上磷的损失是同物理、化学和生物现象紧密联在一起，这就决定了流失的速率。

由于磷元素的匮乏和农业生产的需要，人类对磷的循环做了比其它任何元素都多的大量工作。世界磷矿的开采量在1990年预计将达 9.4×10^6 吨，其中70~80%是用做农业肥料，其余部分用于作洗涤剂、动物饲料添加剂、杀虫剂或医

疗用品。目前主要是处理矿产中高质量的磷元素和水域中含磷的沉积物。从长远来说，磷元素有可能成为农业生产的限制因素。磷循环见图2-5。

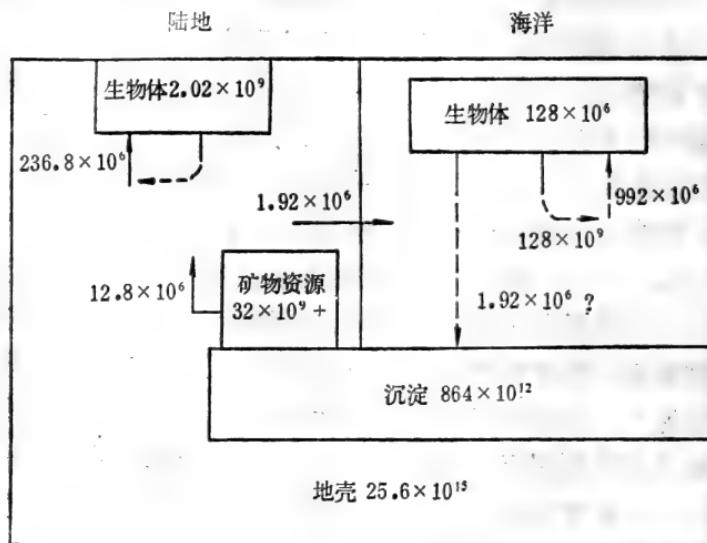
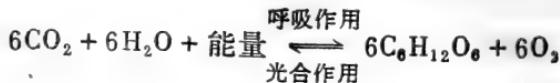


图2-5 全球的磷循环。(图中数字包括工业和农业对磷的贮藏库的存量和输出量的影响, 数字单位为顿/年, Pierrou, 1976)

2 碳、氢、氧的气体循环

碳、氢、氧的循环是紧密联系在一起的。我们在这里强调在自然界条件下, 它们之间的相互关系以及人类活动对它们循环过程的影响。

碳、氢、氧的消长可以通过光合作用和呼吸作用的交替来说明:



在这个过程中形成的总初级产量被植物利用来进行呼吸作用的比例随植物种类、地区差别而异，一般变动范围为20~75%，平均为50%。换句话说，由植物固定的50%的二氧化碳和水，被它们自己生命活动所消耗，剩下的一半也就是净初级产量，将由异养的食草动物食用或被毁坏、分解。这种生产者（植物）和消耗者（动物）之间的平衡关系是经过几百万年的进化过程而形成的。在长期进化过程中，大量的还原碳从生物圈中被动用，从而加速了空气中氧的累积。在地球形成的历史过程中，由光合作用所累积产生的氧约为 13×10^{15} 吨。气圈中含有约 0.8×10^{15} 吨的氧，溶解在水圈中的氧仅有 0.2×10^{15} 吨。因此只有一小部分的氧作为自由氧而存在气圈中，其余部分都以矿物质氧化物、硫化物和碳化物累积在岩石圈里或以水的形式存在水圈里。现在矿物碳的动用进行得很快，因为燃烧矿物油和优质煤加速了还原碳的释放速度，它约超过了矿物碳贮存速度的2000倍。尽管在这种氧化过程中每个还原碳需要两个氧原子，但空气中氧的含量在近100年间并没有明显的减少。有人估计，从1910~1970年，空气中氧含量最多减少约0.005%。但是，地球里一切高级燃料（煤、油或天然气）的燃烧有可能减少空气的氧水平达1.8%，地球中全部页岩里低级有机碳的燃烧有可能耗费气圈中约50%的氧。并且，应用这些矿物资源将产生许多环境问题，如煤渣和页岩的处理不能不引起人们的注意。

我们知道，大约93%的氧和99%的总碳量都埋存在沉淀库里，多以碳酸盐形式出现。而只有不到10%的总碳量含在生物圈里。同时可供应的在地球表面的分布也不均匀，只有0.2%分布在海洋里，尽管海洋的面积占地球总面积的约71%。我们可以推出生物量和产量的比例在陆地约为17:1，而在

海洋约为0.07：1，因此我们可以说在海洋里氢、氧和碳的周转比在陆地要快得多。这是因为碳在陆生植被中的停留时间大约为15~20年，而在海洋里生活的植物中停留时间还不到一个月。主要原因是在海洋里绝大多数的海洋植物是单细胞植物（浮游植物），它们的寿命对比陆生的木质植物要短命得多。在陆地，死有机物质的转化要慢得多，特别是植物组织中含有大量纤维素和木质素，这些物质是不容易溶解的。因而在陆地，这些有机物质具有长期累积在土壤中的倾向性。在多数情况下，在碳输入到分解亚系统与二氧化碳的矿物化之间会达到平衡，而相反的生产和呼吸过程有可能临时分别进行。这可由北半球空气中CO₂含量的季节变化得到说明。在夏季，二氧化碳的固定作用过程超过总呼吸量，而在冬季，情况正相反。它们之间的差异可达20ppm。

有的工作者利用24小时内生产量与群落的呼吸量之间的差异或者昼夜二氧化碳的消长来估计初级生产量。

目前大约每年有 5×10^9 吨的碳增加到气圈中去。其中有一部分保留在空气中，另一部分被溶解到海洋中，还有一部分增加到生物量中去。

在地球上，氢原子参预光合作用的过程仅仅占水通过植物的极小一部分。通过植株的绝大部分水分都由蒸腾散发出去，植株根部吸收的水分和营养物质送到叶部以供生物合成之用。由于森林蒸腾的水分极为可观，例如每公顷枞树每天蒸腾水分约有48吨。这就需从土壤中大量吸收水分，很显然，这可减轻水在地表面的径流、淋溶和浸蚀。因此，人们可以预见到，在某些最大雨量地区，如热带雨林，森林的破坏会招致长期的效果，使大陆的水分失去平衡，以及对碳循环产生影响。

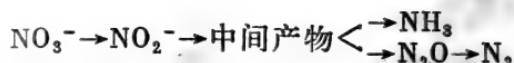
3 氮循环

氮循环是一种典型的气态循环，而且是最复杂的营养成分的循环之一。不仅因为这个循环中涉及多种类群生物，而且在循环里，每一个环节中都各有其特殊的微生物参与。地球的大气圈是氮元素的主要贮存库（氮成分占大气层的79%）。尽管成分比例较大，但气态氮是不能被大多数生物利用的。氮元素主要通过固氮细菌和蓝绿藻的活动而进入生物体。在进入生物体之前，它必须由生活的固氮微生物将气态氮元素转化为被植物能吸收的化合物（如硝酸盐）。植物根系从土壤中吸收的营养物质，进入植物体内转化为组织中以氮元素为主体的植物蛋白质。与此相反，动物不能直接利用氮素，它必须依赖植物提供氮素作为构成动物体内的蛋白质。固氮作用是在有氧条件下通过固氮菌科(*Azotobacteriaceae*)的成员，例如固氮菌属(*Azotobacter*)和许多的蓝绿藻来进行的。在厌氧条件下许多棱状芽孢杆菌(*Clostridium*)和脱硫弧菌属(*Desulphovibrio*)种类，甚至有些杆菌和肠杆菌属(*Enterobacter*)也参与其中。另外共生菌系（主要是豆科植物的根瘤菌）把氮变成氨(NH₃)，然后被植物所吸收。植物体内的蛋白质被草食动物所利用或直接和动物尸体及其排泄物一同转入分解者亚系统。它们的残体被细菌分解为氨。这种过程称氨化作用，其结果是使动物体内的氨基酸转化为氨。溶化的氨在土壤溶液中被植物所吸收，或者再经过硝化作用变成硝酸盐而由根系吸收。硝化作用的逆过程称为反硝化作用，



在厌氧条件下把硝酸盐转化，最后变成氮返回到大气中，从

而完成了循环。



参与反硝化过程的细菌如假单细胞属 (*Pseudomonas*) 和硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 把 NO_3^- 还原成 N_2 ，其它许多细菌也把 NO_3^- 还原成 N_2 。

由上所述，可以看出氮通过固氮作用，从气态转化为硝酸盐化合物。能产生固氮作用的途径可总结为三点：

(1) 生物固氮是由生物固氮菌来完成的，这些固氮菌有自由生活在土壤中、有共生在豆科植物根瘤上面（如豌豆、菜豆、苜蓿等），也可以由海洋中某些蓝绿藻来完成。

(2) 大气固氮由空中发生物理化学过程来完成。例如闪电能把空气中的氮转化成硝酸，酸溶解在降水中，随下雨降到土壤中，植物根部吸收水分时把它带到体内。

(3) 工业固氮，由人工借助一种与大气固氮原理相似的工业方法来完成。

我们必须进一步指出，根据目前文献资料，每年生物固氮量大约在1.26亿吨，再加上少量的瞬时固氮，（通过如闪电固氮、火山喷发、紫外线放射）估计每年约有0.26亿吨。是但全球植物每年需氮量超过固氮量的35倍。这说明氮的重要性和氮不足的严重性。另一方面没有迹象表示氮可以连续累积或在自然条件下可以冻结起来，因此，必须由反硝化作用进行固氮速率的平衡。

当农作物对氮的需要量不足时，主要依靠施加肥料来补充。在二十世纪初，肥料的自然来源为南美智利的硝酸盐矿。在1914年工业界哈伯固氮法发明之后，依靠该方法，到1976年每年产量达48百万吨。但供与求之间相距很大，原因

是工业固氮需要能源和氢，而能源主要来自天然气、矿物油，因此，大量生产氮素受现有的矿物燃料贮藏量的限制。全球人口激增，需要更多的粮食，因而每年需氮肥量递增约8~10%。有人估计一个国家每增加六百万人时，需建一个新哈伯工厂，每天生产一吨氨。按七十年代中期印度的人口增长率，每年需新建2.5倍类似产量的工厂才能满足要求，可想而知，我国需要增加的氮量就远远超过此数。施在田间的氮肥约30%左右被农作物所吸收，其余部分被淋洗到淡水或海洋系统中去。在水域中，反硝化作用速度赶不上水中的超负荷的氮素，其结果水的硝盐污化或富营养化发生。除此之外，有证据说明致癌物质如亚硝胺逐步在环境中增加。同时也有迹象说明由细菌反硝化作用的付产品氧化亚氮对于大气中臭氧层也有不利的影响。所以从环境保护和经济效益角度来考虑，人们目前已把注意力放在生物固氮方面。微生物固氮需要的费用仅是工业固氮费用的很小部分，因为只用少量的固氮酶，整个生物圈的总生物固氮只需要几公斤这样的酶就能完成的。虽然生物固氮可以提供解决氮肥缺乏的一条途径，但它还未能解决富营养化问题、固氮和反硝化作用之间的平衡问题。

4 其它元素的循环

前面讲的只是表2-2中21种元素中的五种。各元素都有它们的特殊的运转和循环的途径。现在有的元素循环受到人为干扰很严重，例如硫循环就受到人为的很大干扰（见图2-6）。除了氮元素外，还有其它的重要气态循环，都同沉淀循环有联系。例如，钙、镁、钾、硅、钒等元素，各种生物都有其特殊需要量。这些微量元素也同样在生物圈里进行循

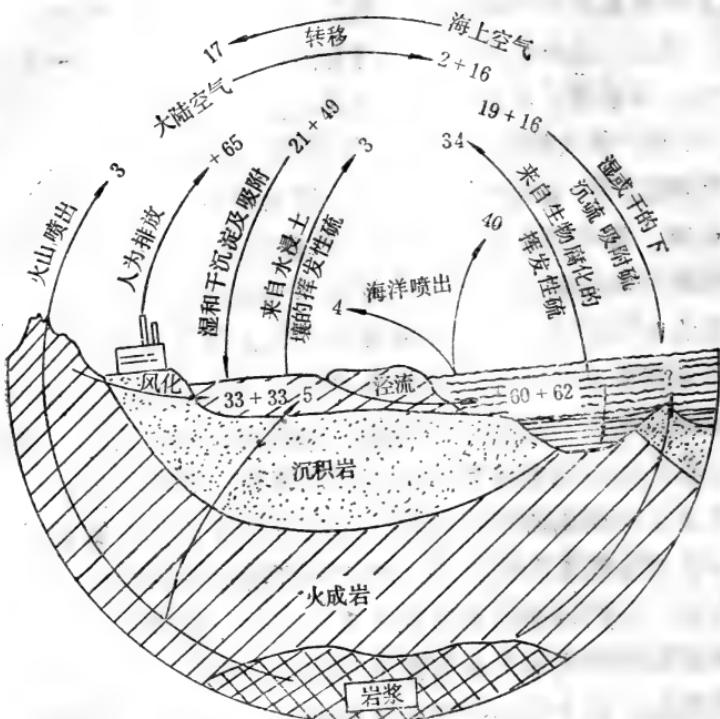


图2-6 全球的硫循环
(图中数字单位为 10^6 吨)

环。有些元素在一定浓度下是生物必需的微量营养物质，但在高浓度时却成为有毒物质，还有些没有什么有益的生物功能。在这一类中不少元素对环境有极重要的影响，如铅、汞、镉、砷、铍、镍、铬、硒、钼、铜、锌、钒都有广谱的毒性作用。

植物对土壤中的重金属的能耐程度变化很大，这种现象对采矿相当有意义，有可能用它来寻找新矿藏。这种应用生物、地质、化学特性来测报矿藏的方法已有记载。植物的重金属含量和成分有可能反映地下矿层的性质。此法探测铜矿

是十分成功的。此外对锌、钼、汞、金、银的探测也很有希望。但这一切都需要有植物与土壤关系的详细的生物学知识才行。有些动物种类，特别是软体动物和甲壳动物，对其体内累积的大量重金属有特殊亲和性。这一点被人们用来探测或监测在水域中的镉、铜、锌的污染状况。

微量重金属的资源是有限的，而且是不能再生的。人类以各种分散方式动用它，有些是不经济的，而且实际上是很困难恢复的。从长期说，这种动用对生物系统，甚至对工业经济都有不良的效果。如铅的循环，一方面是人为造成的，同时又直接影响到人类本身的健康。人们生活在高浓度铅的大城市或工厂区环境里，铅的危害是严重的。铅盐化合物一般较难溶解在水中，因此水域里的铅含量比土壤里的含量低一至两个数量级。在今天工业发达的社会里，人们大量动用铅资源，每年达400万吨。其中一半以电池装置、铅缆、铅管和铅箔等形式再循环。还有一半主要是以烟雾形式分散到空气中。每年作为防爆剂添加到汽油中的铅有 12×10^3 吨，煤燃烧的烟灰中约含铅2750吨。这些烟雾在空气中的半衰期约为7~30天，然后才散落在地面或水域系统。动物是以烟雾或尘埃形式接受这些元素，而人们则处于严重毒害威胁之中。在铅工厂附近的地区，空气中的铅量经常高达1000~4000ppm，含高浓度铅的土壤或灰尘对人类危害极大。植物能吸附铅，含铅灰尘下降到食物上，人就会吸食大量的铅而中毒。铅的含量虽然大，但它究竟还不是最毒的重金属。象镉、汞等重金属的生物活性更大，这些重金属和其它杀虫剂、有机化工产品可以由植物富集起来，造成很大危害（见图2-7）。

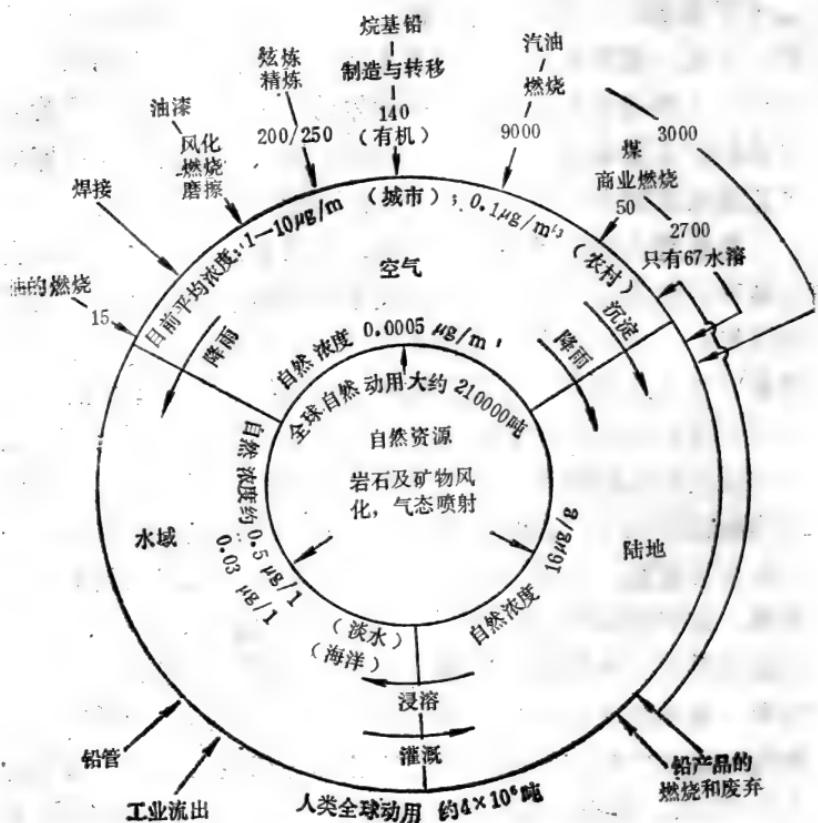


图2-7 环境中的铅 (数字单位为吨/年, Anderson, 1981)

(五) 水生生态系统

水占全球面积约 71 %, 淡水只占约 2~3 %。虽然淡水水面不大, 但是它在生态系统中占非常地位。这是因为淡水使用方便、廉价, 它是工业和民用水的最重要来源; 许多生物地质化学过程都要通过水的流动来完成, 同时淡水又是处理废物最方便和最经济的物质。在许多国家, 流水又是

电力的重要来源。从经济学角度考虑，世界许多国家的内陆湖泊又是用来生产鱼类蛋白的重要来源；从人民生活福利方面考虑，江河、湖泊、溪涧是旅游业的主要场所。

湖泊作为生态系统一种类型（见图2-8），按其结构可以分成不同层带。近岸带的范围是从湖岸到有根水草能生长的地带。深水湖泊的这部分很窄，从而大型水草生长很少，净生产量无足轻重。反之，浅水湖泊，这部分面积较广，水生植物生长茂盛，其中浮游植物和高等植物占同样重要位置，它们的固碳作用几乎相等。湖泊岸带中的植物和动物群落的发展，自然受湖泊大小和岸带暴露程度的限制。湖泊岸带暴露越多，沿岸带多砂质，沿岸湖底多石头，动植物类就少。但在同一湖泊较隐蔽的岸带，水生植物种类很多，岸底部多软泥，产生复杂的动物群落。动物并不取食植被，更多的是碎屑取食者。湖泊的中心称为湖心带，其阳光照射程度随湖泊的深浅而异，光照的强度 (I) 随深度而减退，一般以下面公式表达：

$$\frac{dI}{dt} = -kI$$

其中 k 是光照消减常数， k 值在净水域的值为 0.03，在软泥湖泊或富营养湖泊， k 值可增加到 0.2~0.40。光照的强度逐步减退到光照补偿水平，在这个水平上，植物的光合作用同它的呼吸代谢处于平衡状态。在这个水平之下称为深水带，因为这层带光照达不到，所以不能进行光合作用。在这层带里，异养动物主要依靠光照带残余下沉的碎屑或依靠河流洗涮到湖底的营养物质为食。在湖泊光照层带，浮游植物（主要单细胞藻类和硅藻）担负着光合作用的任务，它提供植食系统的营养物质。一般认为，在这层带里生产量超过群

落的呼吸量 ($P > R$)，这里生物的尸体下降经过补偿带 到深水层，在深水层里生物的呼吸量超过生产量 ($P < R$)，见图2-8。

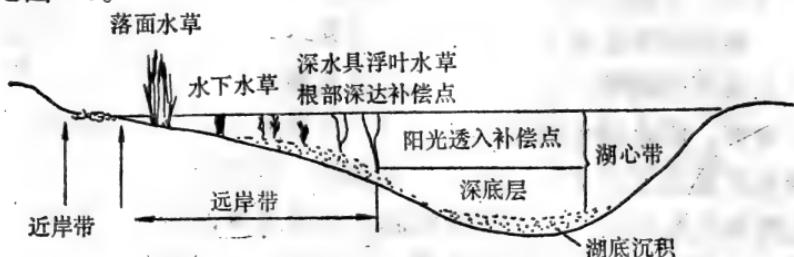


图2-8 一个湖泊的主要生活带

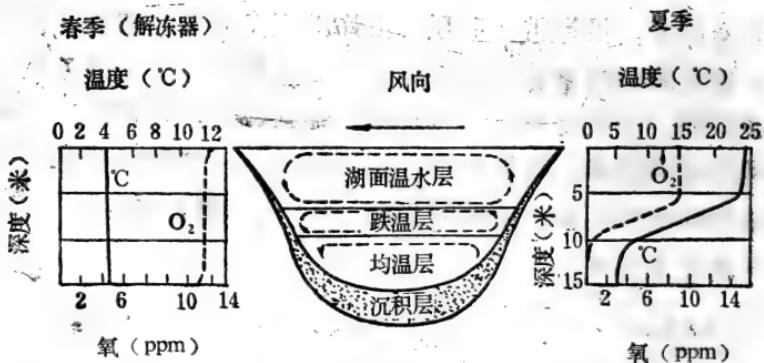


图2-9 典型的北温带湖泊的温度分层

湖泊系统的功能随地区和季节而变动，特别是深水层带，它的季节氧和营养物质含量是由水温决定的(见图2-9)。

图2-9说明在温带深水湖春季和秋季各层次的温度和氧含量的周转变化。春季湖水解冻后，水各层的温度平均都在4°C，其氧含量除表面略高和底部略低外，均接近13ppm。当季节进入夏季，湖表面吸收热量，使温度上升到近25°C，但热量并未深入到深层，湖底仍保持近4°C。湖表面上的风使上层密度较低的水独立循环，与下面的水层无关，形成不同

的层次，总称为水的分层。在最上层称为湖面温水层，最下层称为均温层，在两层之间相隔有温度变化较急剧的水层称为跌温层。跌温层并不一定与光照层的深度相一致。有时光照层的深度只有2米深，而表水层可深达15米。在深水层的水流可以与表水层水流方向相反。但是表层水的氧气的含量与营养成分很少，经过温变层进行交流。在热带，湖泊水的分层是永久存在的，但在温带地区，有时这种随湖泊的深度变化分层并不明显。如果一个湖泊的底层沉积生物需氧量(BOD)很高，那么，深水层的氧含量可以减少到无氧状态，同时，在长期过程中，深水层可以完全没有生物。在热带深水湖泊里的深水层是没有好气生物的。在这种情况下出现硝酸还原作用，同时出现还原镁和还原铁。

在温带地区，当从夏季转入秋季，表面水温下降，直至表面水层与深水层温度相等，最终深水层与上层的温度倒转过来。当温度继续下降到冰点，上层水温反而比底层水温低，上层低温覆盖在下层高温上面，这种平衡与循环在翌年相继再度出现。但是这种现象在浅水湖泊里并不明显。

这种周转是深水湖泊的特征，它对初级和次级生产有明显的效果。在近岸区自养植物与异养动物之间的营养交流混合在一起，而不是明显地区分开来，但是在深水区深层的分解者释放的营养物质并不直接提供给浮游植物，而是在温度周转时期中实现。在春秋两度周转时期中，浮游植物（如藻类）经常表现出急剧生长或“爆花”现象。这种现象受到湖内的最少限制元素所制约，一是湖上层的限制元素消耗完毕，“爆花”现象才算结束。最普遍的限制元素是磷、氮和钙。其它元素如硅对某些种类植物（如硅藻）也是很重要的元素，不少藻类对于某些元素有特殊的适应，能够大量摄取

元素超出其短期的代谢需要量，这样在营养元素耗尽时藻类仍然生长。浮游动物的数量比浮游植物的数量大约晚一个月才达到高峰。当浮游动物达到高峰时，浮游植物的数量开始急剧下降，一方面因为营养物质不足，另一方面由于浮游动物取食的缘故。这种季节性的浮游动物—浮游植物的数量颤动是与水上层营养物质的短期循环机制交织在一起的。浮游植物被浮游动物食入后变为排泄物排出，特别是磷元素，被禁锢在细菌体内的溶解性磷，此时也因原生动物的取食而释放出来。这些内部循环机制对分层明显的湖泊是十分重要的。

在自然条件下，湖泊按其营养物质富饶情况，可以分为寡营养湖泊和富营养湖泊（详见表2-3）。

典型的寡营养湖一般都是水清又深的水域，出现在酸多和火成岩的地区。湖坡陡峭，湖岸狭窄，流入湖中的营养物质很少，浮游植物的产量不高，每年每平方米碳量在15~50克范围之内。寡营养湖出现温度分层现象，但很少出现“爆花”现象，这是因为氮和磷供应量不足。

富营养湖一般很浅，出现在低洼地区。浮游植物的产量比寡营养湖至少多十倍以上。因为湖泊营养基数大，同时营养物质的流入量也大。温度分层现象视湖泊深度而转移。深层有机沉淀物常在无氧条件下。藻类在某些季节大量繁殖，使湖水颜色变绿或变红。颜色优势取决于藻类的种类。

上述两种类型的湖泊代表两种极端的情况，实际上在两者之间可以排列各种不同的营养类型。当湖泊逐步累积了沉淀物质，其营养基数增大，可以由寡营养湖泊转变为富营养湖泊。一个湖泊的富营养化过程可以通过农业或生活污水的流出量而加速发展。由于农业现代化和人口激增，附近湖区

表 2-3 湖泊类型的一些特征

(Whittaker, 1975)

项 目	寡营养	中营养	富营养
净初级生产力 (克/米 ² ·年)	15~50	50~150	150~500
浮游植物生物量 (毫克/米 ²)	20~200	200~600	600~10000
总有机物质 (ppm)	1~5	2~10	10~100
叶绿素 a (ppb)	0.3~3	2~15	10~500
光照深度 * (米)	20~120	5~40	3~20
磷 总 量 (ppb)	<1~5	5~10	10~30
无 机 氮 (ppb)	<1~200	200~400	300~650
总无机溶质 (ppm)	2~20	10~200	100~500

* 光照深度系指在该深度处至少有1%中午光照强度到达。

受到大量氮和磷的输入，因此经常在夏季出现藻类“爆花”现象。在白天，湖上层氧气达到超饱和状态，但到了晚上，由于群落呼吸使水表面层缺乏氧，鱼类和其它无脊椎动物难以生存。水底层几乎终年都处于缺氧状态，由藻类的残留尸体下沉形成的深层有机沉淀物维持了该水层的营养累积过程。这种情况严重影响淡水渔业。沉淀物释放的气体为无氧代谢产物如H₂S，臭气冲天，使附近居民难以忍受。唯一的办法是建立严格排污管理制度，否则浅水湖泊的严重污染情况是很难恢复到原来的平衡状况。

三 生态系统的生产力、能量消耗和种群生态学基本概念

(一) 初级生产力

在植物生态生理学文献中，经常要遇到净初级生产力（NPP）和总初级生产力（GPP）。对于异养动物的影响，前者比后者更多被科学工作者所采用，因为在测定技术上前者比后者更容易些。即或在最有利的条件下，植物的初级生产力仅是植物接受总有效光合作用辐射（PAG）的一部分。植物光合作用的效能是以光合作用和呼吸作用的强度来表达的，二者都会影响到较高一级的营养级（异养生物）所获得的能流。

光合作用的效能经常是以总初级生产力占总有效光合作用辐射能的百分比来计算的。例如森林的效能最高约占2.0~3.5%，一般的杂草上有1~2%，而浮游植物更低，只有0.5%。这种差别的原因很复杂，是由许多生理和生态因素相互交错在一起的。光合作用速率的快慢主要决定于光照、二氧化碳的含量和湿度。植物对这些因素反应不同，可以区分为两种类型植物，一种称为C₃植物。另一种称为C₄植物。它们是光合作用途径不同的植物。

C₃植物的二氧化碳固定的初级产物为3-碳有机酸：核糖二磷酸盐（5 C）+ 二氧化碳 → 磷酸甘油酸（3 C）。这种二氧化碳固定方式普遍出现在藻类和大部分维管束植

物。而C₄植物的二氧化碳固定的初级产物为4-碳有机酸：

磷酸烯醇丙酮酸(3C) + 二氧化碳 → 天门冬氨酸(4C)
和苹果酸(4C)。这种二氧化碳固定方式并不普遍，仅出现在少数维管束植物，有一半种类属于杂草植物。单子叶和双子叶植物都有C₃或C₄植物的代表。

C₄植物比C₃植物具有强3~4倍的光合作用效能，特别在高温条件(30~40)℃和强光照条件($3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 勒克斯以上)下更为明显，这些特征在农业上的利用有很深远的意义。

C₄植物的营养价值比C₃植物差，因为前者围绕在维管束周围的淀粉不好被食草动物所利用，而C₃植物的淀粉全部分布在叶肉组织内。同时C₄植物叶子里含氮量较低，而且C₄植物不能消化的木质素比C₃植物多两倍。这就说明C₄植物作为饲料作物的营养物质比C₃植物要逊色一些。事实证明，用C₄植物来喂养蝗虫，若虫的存活率比用C₃植物降低很多(从37~53%降低到27%)，同时成虫的产卵量也大大降低(从每雌产卵97~256粒，降低到只产22粒)。

在表3-1中我们将C₃和C₄植物的光合作用特征加以比较。

光合作用与光照强度关系是极其复杂的，植物只能在光照强度与呼吸作用相互平衡点之上才能生长。这个点称为“光照补偿点”，它随植物种类(C₃或C₄植物)。光照强度、温度和二氧化碳浓度不同而变化。这种差异主要决定于呼吸速率的快慢，呼吸速率慢比速率快时，叶片完成二氧化碳固定过程需要光照量更小。C₄植物，如高粱、玉米、谷子和甘蔗在太阳普照之下也不会感到满足，甚至在热带全光照强度下也很难达到饱和点。C₃植物一般需要光照强度较弱，

表 3-1 C₃和C₄植物的某些光合作用特征的比较

特 征	C ₃ 植 物	C ₄ 植 物
叶子解剖	光合作用的细胞无明显组织	管束的组织明显
羧化酶	二磷酸核酮糖羧化酶(RUDR)	先用PEP羧化酶，后用DUDR
CO ₂ 补偿点(ppm)	30~70	0~10
光合作用是否受含O ₂ 21%所限制	是	否
光呼吸可测否	能	只在维管束内
光合作用的最适温度(°C)	15~25	30~40
蒸发商 (每克水/克干重)	450~950	250~350
干物质产量 (吨/公顷·年)	22±0.3	39±17

但是有些例外，如花生和向日葵，它的饱和点几乎与C₄植物的强度相等。至于森林则介于C₃植物和遮光植物之间，饱和值为全光照的25%或更少些。

光合作用和二氧化碳浓度、湿度的关系也极密切。在主要生产季节里，如果叶子附近的二氧化碳浓度不足时光合作用的速率就降低到亚水平。C₃和C₄植物对于不同二氧化碳的浓度反映也不一样，在强光照条件下，当二氧化碳为50~100 ppm时，C₃植物的二氧化碳固定作用与呼吸作用经常达到平衡，C₄植物即使二氧化碳在0~5 ppm时，二氧化碳固定作用和呼吸作用仍然进行。在湿度受抑制的情况下，叶子的气孔开始关闭。在干燥条件下，叶子作适应性的调节以减少水分的损失，二氧化碳的摄取受到阻碍，从而C₃植物的光合作用受到限制。但是C₄植物继续以高速度进行光合作用，以更有效的方式利用有限的水，以避免通过蒸发使水分受损失。

被自养生物所消耗的能量需由光合作用合成的物质来负

担。浮游植物群落的呼吸作用只占总初级生产力的30~40%，在温带的草原和农作物可提高到约40%，温带森林达到50~60%，在热带森林可高达70~80%。一个植株的能量固定 的全面效能是以净生产效能来测定的（即NPP/PAG）。不同学者所估算的数字互有出入，有人估算理论值的上限为2~5%，有人估算的上限值可达到10%，然而实际的观察值一般都低于此水平。若已知PAR到地表的输入值，则NPP的理论值和观察值是不难被计算的。显然，对陆生植物的生产力光照不是唯一限制因素，最优净生产力仅仅在光照、温度、湿度和矿物营养物质一切都在最适条件下才能获得。但是最优化的条件是很难满足的，即使在较好的农业管理下，也是不容易达到的。

关于全球的净生产力的估计为 $100\sim300\times10^9$ 吨（干重）。利思（Leith）1975年估计为 176.7×10^9 吨，其中海洋生产力占 $1/3$ ，大陆占 $2/3$ 。这个比例与实际海洋面积与陆地面积之比正相反。这充分说明在生物圈里初级生产力的分布是不平衡的。可以明显看到，在大陆上不同纬度的净生产力有梯度的差别，从冻原地带向低纬度有逐渐增大的趋势。从冻原（140克/米²·年）到温带（600~1200）克/米²·年）有很大差别。这与雨量，年平均温度和植物生物量的梯度是相适应的。这些参数的变化可以用来预测该地区的净生产力。利思等在1972年就利用全球各地蒸腾数值换算成净生产力，用电子计算机作图所得结果与观察值很接近。

至于海洋的平均NPP只有125克/米²·年，这仅仅相当于陆地的冻原或半荒漠地区的水平。当然，有必要指出海洋的生产力在不同地理地区也是不平衡的。特别在大陆架附近的海岸NPP很高（400~1000克/米²·年）。至于内陆水域由

于生活污水和农业径流的作用，NPP可在200~600克/米²·年范围内变动。磷和氮素是生物生长的要素，它限制了内陆水域的富集现象。

一个水域或陆地生态系统的生产力也可以按营养物质的多寡来对比它的收获量。肥沃的土壤含有0.5%的氮含量，能生产50公斤/米²（干重）的植被；而富饶的海洋水域只含 0.5×10^{-4} %氮量，只能生产不超过5克/米²（干重）的浮游植物物质。人类对于如何开发海洋的初级生产力的工作做得很不够，有待于今后的努力。

世界作物产量是同净初级生产力连在一起的。1974年全球粮食产量中各物占56%。其中大米和麦子占40%（见表3-2）。

表 3-2 人类食物能量的资源 (Ehrlich 等人1977)

粮 食 种 类	提供能量的百分率
谷类作物	56
大 米	21
小 麦	20
玉 米	5
其 他 谷 类	10
根类和块根类	7
土豆、山药	5
淀粉植物	2
水果类、坚果和蔬菜	10
糖 类	7
脂肪和油类	9
家畜产品和鱼类	11
总 共	100

从表3-2可以看到人类所消耗的能量和蛋白质，谷类作物约占一半强。在1974年，大米成为全世界20亿人的主要粮食，估计该年产量达到3.23亿吨。

目前，除一些发达国家已经超过人类最适营养水平外，世界许多国家都处于最适营养水平之下。很难精确估计出全球有多少人粮食不足或营养不良，一般认为只得到次营养的人占全球人口总数的 $2/3$ ，而约有5亿人处于饥饿状态。

全世界人口的增长速率是十分惊人的（见图3-1），在纪元零年时的人口估计只有2.5亿，在那以后的1600年间人口增长很慢，到1650年才达到5亿人。随后人口加速增长，到1850年，人口又增加一倍，达到10亿人，加番的时间缩短为200年。以后加番年数愈来愈短，到1930年，全球人口总数达20亿人。过45年到1975年人口数字又加一番达到40

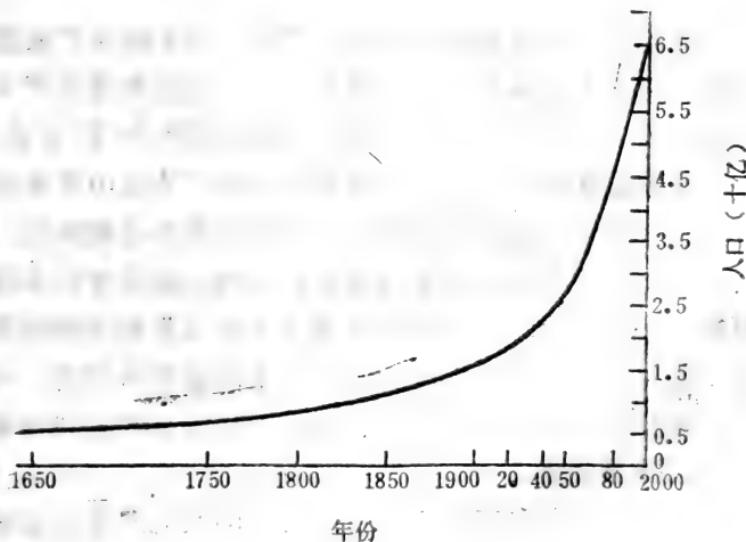


图3-1 世界人口急剧增长的趋势

亿人。1980年全世界人口已达44.13亿人，世界人口每年净增加9000万人。这样增长会给人类的粮食和居住的环境带来多么大的负担？

很显然，这样的人口增长速率不可能无限制地继续下去。因自然界生产的粮食和其他资源迟早会达到极限，到那个时候，人口的增长不可避免地要停止下来。

目前欧美国家（如美国和加拿大）平均每年粮食供应量为1000公斤/人，而发展中国家有的每年只有180公斤/人。印度的粮食主要作为直接食用，相反，在美国和加拿大，仅有90公斤供食用，其余部分做家畜饲料，69%的蛋白质来源于动物产品。

（二）次级生产力

初级生产力因植物种类和群落不同，它们的生产效能是不同的。至于生态系统中的次级生产力，它比初级生产力更加复杂，因为它是由许多生理类型不同的有机体集合在一起，组成多层次的营养级，而且它的总生产力是由草食动物亚阶层和分解者亚系统的不同营养层的成员综合起来的。因此各层间的物质交流与能量转换是复杂的，而且受许多因素的影响。它们的生态效能自然要服从于热力学和生物化学的法则，而且也受时间和空间上变动的生态参数所制约。一般来说，在任何生态结构系统间，初级和次级生产之间很难找到它们的简单关系。

如何测定一个物种的次级生产力，即使它的生活史比较简单，测定也是一个复杂的过程。最基本的方法是在不同间隔时间取一组或一个世代种群，测定生长的增量和出生率、

死亡率的变化。

关于生产力的估计，多集中在草食性动物种类上。有文献涉及动物群落生产力的估计，但关于生态系统的完整研究材料尚缺乏。目前注意力更多集中在模型的建立，这样就使得预测不同营养层内或生态系统间的生产力成为可能。这样的研究能告诉人们一个种群间和不同营养水平上的能流的基本原理。现用图 3-2 加以说明。

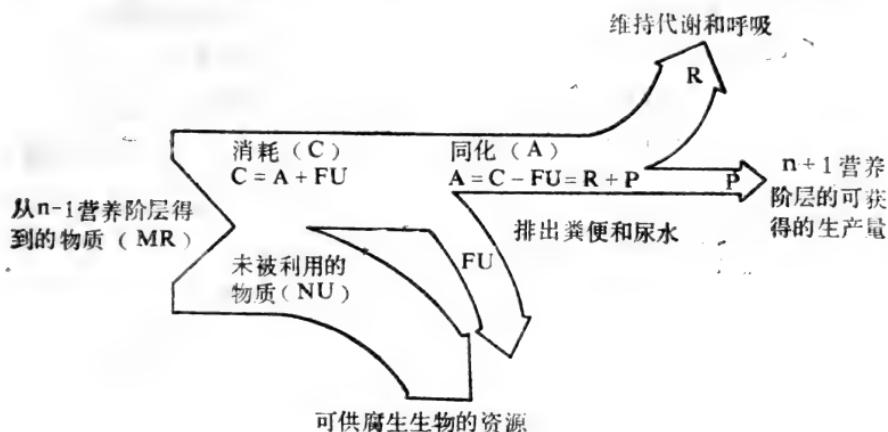


图3-2 第几营养阶层动物所利用的资源简图

从图 3-2 中可看到一种动物（如蝗虫或鼠类）从营养层 ($n-1$) (如杂草或谷类) 取得部分食物 (MR)，并非全部食物都被利用，而是有大部分食物不被利用或遗弃 (NU)，其中有一部分真正被消耗 (C)。人们应用消耗 (C) 作为动物从前一营养层 ($n-1$) 获取总能量的输入部分。这部分能量被摄入动物体内，经过消化作用，一部分能量被同化 (A)，其余不能同化部分则被作为粪便或液体废物排出体外 (FU)。这部分排泄物虽然也是代谢的产物，但它不参预到次级生产中去。因此同化作用就定义为消耗和排泄间的差，或 n 营养层

维持代谢的呼吸量和生产量的总和。

$$A = C - FU = R + P$$

一种动物的同化效能 (A/C) 同食物的质量有紧密的关系，它代表食物的成分同消耗者组织间的相似性。食物成分与消耗者组织愈接近则愈容易被同化。在表3-3中，我们按不同动物类型分别列出同化效能 (A/C) 和生产效能 (P/A) 的比较。从表中可见，它们的同化效能，腐食性生物最低，食微生物者与吃草动物类似，草食动物低于肉食动物。

表 3-3 按分类排列异养生物的典型的同化效能 (A/C) 和生产效能 (P/A) 比较。
(同化/消耗 = A/C ; 生产/同化 = P/A)

类 别	营 养 功 能							
	腐食生物		食微生物		草食生物		肉食生物	
	A/C	P/A	A/C	P/A	A/C	P/A	A/C	P/A
微 生 物	/	0.40	/	/	/	/	/	/
无脊椎动物	0.20	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.80	0.30
脊椎动物								
恒温动物	/	/	/	/	0.50	0.02	0.80	0.02
变温动物	/	/	/	/	0.50	0.10	0.80	0.10

这些被同化的物质，一方面用来维持动物基本代谢和活动所需的能量，另一方面供给生产（生长）所需。这些维持量是以代谢热量或以呼吸 (R) 来测量的： $A = R + P$ ，因此得出： $P = A - R$ 。

对动物来说，维持生命活动既需要有一定的能量，同时还需要有一定的营养物质。比方说，人每天需要将身体中约 5 % 的蛋白质排出体外，同时将同化的氨基酸再重新组成蛋白质。这就是为什么我们说营养不良不仅是蛋白质本身缺乏的问题，还有因某种高级蛋白质不足所引起的。动物的生长

需要在食谱中能提供与动物组织类似的各种氨基酸。当关键的氨基酸缺乏时,那么只有总蛋白质的一小部分被利用(例如谷类食物就是如此)。如果将豆类和谷类食物二者配合起来,比单纯供应其中任何一类食物都会更有效地利用蛋白质。

恒温动物(热血动物)为维持体温需付出高代价,即呼出同化能量95%以上,因此,多数恒温动物的生产效能变动范围为1.5~3%,与多数昆虫的生产效能变动范围20~40%相距较远。鱼类和社会性昆虫的生产效能居于上述两类动物之间,约10%。

总之,动物的生产效能随食物质量、生活史的长短和年龄结构而变动,同时变温动物还要随环境的温度而改变。它们的平均值参看图3-3

不同营养阶层间的生产和能流

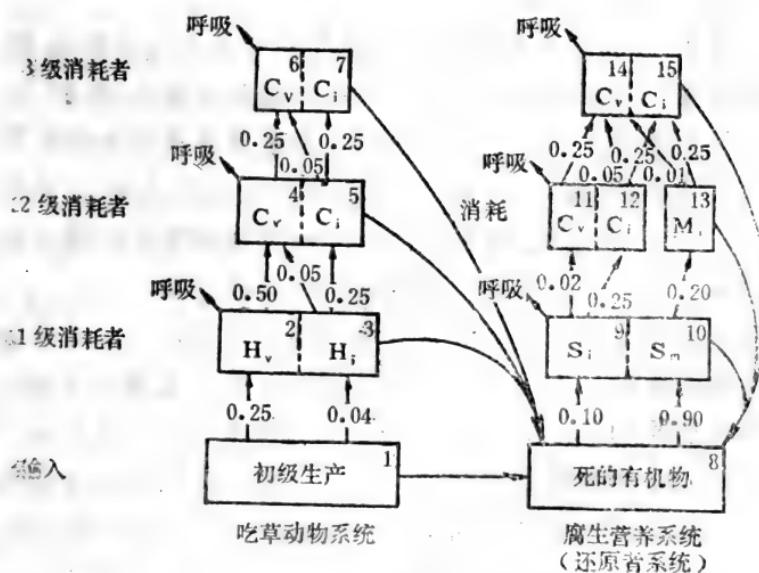


图3-3 陆生草地生态系统的营养结构及消耗效能的简化图解
(数字表示不同营养阶层间能量转化百分率)

1 不同营养层间的生产和能量

一个生态系统是由不同营养层的生物所组成，在次级生产过程中是由不同类型的动物和微生物组成吃草动物和分解者两个亚系统。吃草动物亚系统是以植物为生的。分解者亚系统是以利用或消耗死有机物质为基础的。

当能流输入到食草动物亚系统时，它被代谢并因呼吸作用而逐步散失或以其尸体流入到分解亚系统中。分解亚系统被认为是能量的保持者，因为它可以通过再循环而重新被利用。它的过程比草食动物系统过程要长，要复杂。同时生产的生物量要大，控制能流通过这两个系统的调节的参数是以消耗效能 (C_n/P_{n-1}) 来测定的，即测量上一营养层 ($n-1$) 的生产量被下一营养层 (n) 所消耗的量除。图 3-3 总结了消耗效能的一般平均值。

图 3-3 为陆生草地生态系统的营养结构及消耗效能的简化图解。消耗效能是用来计算在草地的异养营养的生产力， P 为初级生产力， H_v 和 H_i 分别代表吃草脊椎动物和吃草的无脊椎动物， C_v 和 C_i 分别代表食肉脊椎动物和食肉无脊椎动物。 S_v 和 S_m 分别代表腐生的无脊椎动物和腐生的微生物，图中数字代表不同营养层间能量的转换百分数。

一般认为食草昆虫经常只有消耗 NPP 的 5%，而脊椎吃草动物消耗最多不到 20%。在温带地区腐生无脊椎动物约消耗落叶层的 10%，其余的 90% 被微生物所利用。脊椎动物捕食者能大量捕食吃草脊椎动物，但一般认为只消耗被捕食者 50%，脊椎动物捕食者捕食无脊椎动物时，消耗的被捕食者略多于 50%，而无脊椎动物捕食者约只能消耗无脊椎动物 2.5%。

表3-3所提供的数值很有用处，它可以作为模型中估算生态系统的异养生物的生产量。一个模型的建造提供了预测生态系统中各种类型营养层的生产量，同时也可以探索各种生物成分的变化及其效能。无论在草原生态系或非草原生态系，所估算的预测值与实际测定值相距不远。可以这样讲，大多数生态系中食草动物系统只担负异养生物生产量的1.6%，而真菌和微生物却担负其中约94%。因此，在草地或森林系统中，脊椎食草动物对异养生物总生产量不起很大作用。由此可见，在生态系统中，次级生产量的绝大部分是储存在微生物组织中，因此大部分的资源没有被人们所重视和利用。

2 关于家畜生产及其它蛋白质来源

据统计，全世界的家畜品种比种植的作物品种略为少些，常见的品种有猪、牛、羊、水牛、火鸡、鸭、鹅和鸡等，几乎占全球家畜蛋白产量的全部。乳牛生产量占乳量90%以上，水牛只占约4%，其他部分由山羊和绵羊所提供。1973年世界产肉量超过1.08亿吨，其中2/3由欧洲和北美所产。在温带地区，牛羊主要以牧草为生，而北美因为天气寒冷，肉和乳量需求过大，超出牧草的负荷量，相当部分是靠谷类代饲料喂养。猪和家畜除饲以谷类饲料外，还添饲富蛋白物质（主要为鱼肉）。但它们转换率不高，仅有18%。可以看出，在肉类产品中需要付出很高的能量代价。这就从能量角度说明为什么肉类价格是高昂的。要提高家畜产品的效益，一方面必须提高饲料的质量（即同化的效能），而另一方面要减少家畜的活动代谢和基础代谢的消耗。因此现代化的家畜饲养厂把动物限制在一定活动范围内，并在饲养动物的建

筑物内增加热量，给动物以能量补充。

目前科学工作者正在讨论改良家畜种群效能的一些途径有：

(1) 如何把种群中雌雄性比维持在最适比例上，提出人工受精可以显然减少雄性比例的新方法。

(2) 提高雌性的生殖能力。设法提高多产雌性的比例和它后代的繁殖和生育力。

(3) 减少生育期的死亡率，提高生育期的寿命，找出合理亲代取代的年龄以改进种群遗传的潜力。

3 关于淡水养殖业

人们利用各种软体动物（蚌、牡蛎等），甲壳类动物（对虾、螃蟹等）和鱼类的养殖来生产动物蛋白质。世界卫生组织在1980年估计内陆养鱼业的产量约为1.7千万吨，预计到本世纪末可能达5.0千万吨。鱼肉干蛋白的产量相当高，为675公斤/公顷。而牛肉干蛋白的产量却只有78公斤/公顷。这种差别和作物产量类似，同营养输入和养殖技术有很大关系。

就全球范围来说，绝大多数用来饲养淡水动物的饲料都是植物性资源（如米糠，大豆饼、花生浆等）。在以色列、印度和东南亚等地经常加添油饼渣来提高产量。在英国应用加工的人粪饼来喂养家畜、猪和鱼类获得成功。在以色列，鱼类养殖是怎样增产的呢？他们以牛粪来取代传统的颗粒饲料。有人估计，10吨的干牛粪可以转换成4吨鲜鱼产品。在我国民间和东南亚地区，以粪便污水养鱼已有多年的历史。

水产养殖方面，水域环境的温度是一个很重要的因素，它影响水产动物的生长率。但是在温带地区的池塘里，要加

温就会大大提高产品的成本。不过在北美、苏联、欧洲和日本，一些电力工厂附近流出的水，温度一般比周围高8~10°C，这些有利条件可用来养殖各种动物。英国某地把鲫鱼养在恒温（平均温度为25°C）的电容器里，鲫鱼在10个月内体重达970克，然而，在相等的时间内，在15.5°C的河水里体重只有180克。又如，在自然条件下，龙虾经过六年体重才达到450克，而在22°C的流水中只要两年就可以得到同等的重量。

淡水养殖业的产量同农产品一样，在一定程度上同养殖技术的高低，投肥的多寡成比例。人们可以利用有限的土地面积产生高质量的动物蛋白质，同时还可以利用人畜的排污水进行物质再循环。世界各地的海岸湿地估计有4.4亿公顷（多数属红松林湿地），如果仅仅10%的湿地用来发展养殖业，估计至少每年可获得一亿吨的鱼产。

近来真菌培养业引起人们愈来愈多的重视，大多数水稻杆、麦杆被遗弃或烧掉，这不仅是一个有机氮的损失，而且引起环境污染。在废杆上种植真菌是一种产生蛋白质的新来源。真菌的生产效力很高。如普通培植的蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 能够将100千克鲜麦杆转化为50千克重的蘑菇体，当然绝大部分重量是水分。除了蘑菇可供食用外，其余已用过的麦杆还可以饲养反刍动物。同时，对于家畜，真菌丝作为饲料同常规蛋白质补充剂相比也有类似的营养价值。麦杆中的纤维素和木质素也会被转换成为更容易消化的能源，以供其他非反刍动物之用。除了禾谷类作物的废杆可以作为培养真菌的原料之外，其他工厂的杂物如糖稀、树皮，日常废物也都是很好培养真菌的底物。

目前研究真菌作为蛋白质来源的不仅限于蘑菇的培植，

也涉及开发微型真菌，特别是酵母菌的培养。须知酵母菌成份中含有40%的蛋白质，再加上它的单细胞生长型的迅速生长率具有工业化的价值。在工业上两种普遍发展的品系(*Torula*和*Candida*属)可以生长在各种各样的底物上，其中包括制糖的废料、乳清和造纸厂的亚硫酸木浆废水等。工厂也开始在烷链(一种石油精炼的中间物)和甲醛上来培植酵母菌。估计一个工厂年产量可达十万吨，它的产品可以代替乳类、鱼类、大豆蛋白质或猪和家畜的饲料。未来单细胞蛋白质作为人类食品也是有前途的。

(三) 分解过程

分解过程也是生态系中的重要组成部分。它的能量转化和物质循环的基本原理同其他两个亚系统是一致的。但是它的营养动态却同二者完全不一样。它同吃草动物亚系统的基本关系可参看图3-3。有机物质(尸体)进入腐生营养系统之后，通过各级营养层逐步被转化，而未被利用的排泄物和次级产物就成为下一级循环的输入能量或物质。这样，有机物质在每次转化中，通过生物体作用将能量、碳素和可溶解的矿物性营养全部释放出来，直到矿物化作用完成为止。估计作为尸解物质进入系统的能量中约57%被各呼吸作用消耗掉，其余43%作为有机物质被再循环。在各级循环中，物质逐步减少至NPP的1%。这样说法仅是概念地认识分解过程的粗放功能，而不是分解过程的真正数学模型。落叶层的分解过程中的重量损失率并非按照简单的数字序列递减，而是按负指数损失曲线减少。因此，分解过程的特点，随着资源成分不同，分解群落成员的差异以及当时当地的环境条

件的变化（气候、pH、氧气的状态、温湿度范围）而不同。分解过程(*D*)是一个复杂的过程，它是三个子分解过程的乘积，即降解过程(*K*)，碎化过程(*C*)和溶解过程(*L*)的综合结果： $D = KCL$ 。

降解过程：通过酶的降解作用将聚合物分解为单体（如纤维素降解为葡萄糖）或者成为矿物成分（如葡萄糖降解为 CO_2 和 H_2O ）。

碎化过程：主要是物理过程，将物质碎化为更小的颗粒，或通过动物取食的结果或通过非生物的作用（如风化、结冰、解冻、干湿作用）。

溶解过程：完全是物理过程，水将物质中的可溶性成分解脱出来，溶解消耗速率也会受到上述两个过程的影响。

上述三个过程在一定时间中将物质从 R_1 状态转化为 R_2 状态。该过程控制的驱动变量是物质性质(*Q*)、参预有机体(*O*)和当时环境的理化条件(*P*)，可以用图3-4来表达。

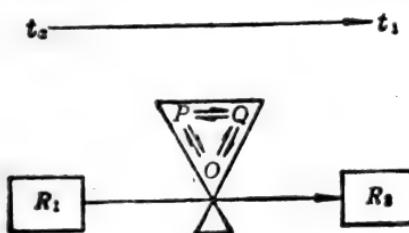


图3-4 分解过程示意图，(说明见正文)

我们已经指出分解过程是由若干亚分解过程综合作用完成的，但还须指出分解作用的调节速率随着等级范围，如生态系统本身，系统的成员和资源成分不同而改变。很明显，在不同水准的等级之间各有不同的生物机体，在各自环境的条件下起其应有作用。可按营养作用不同分成三大类：尸体

营养者、活体营养者和腐物营养者。

腐物营养者种类很多，其中主要有真菌和细菌。这两个类群在自然界中起重要分解作用。它们无论在生长形式和营养方式上都是生存适应的娇娇者。

在微生物中，这两种群靠单细胞分裂而增殖（如细菌和酵母菌），多数真菌是以丝状生长为典型方式，还有另一类群丝状细菌放线菌目也是采取同样方式。应该指出，这种丝状生长方式在分解过程中特别重要，因为它的管状菌丝具有侵入有机物质的能力。例如许多真菌能产生钻蛀菌丝，侵入难以对付的叶子、种子或花粉的角质层。侵入物体之后又可以扯散细胞壁或聚合体分子结构的脆弱部分。不仅如此，在土壤中，这种广泛菌丝的形成对于搬运营养物质和扩大作用是十分重要的。有时木质的腐烂真菌（担子真菌纲）能形成单丝或根皮菌素，把物质输导达数米之远。同时不少菌丝可以以横隔分割为分室，每室具有菌核，因此菌丝可以分段生活，扩大生产能力。此外，在不利的情况下，菌丝还可以产生抵抗不良条件的各种各样的孢子。细胞的内孢子更是突出的例子，它能长期在干旱或高温条件下渡过，甚至在高浓度金属离子下也能保存下来。

腐生微生物的功能主要体现在它们能分泌各种体外酶素，借以分解多聚体成为能被吸收的单体。从总的来说，真菌和细菌都能利用多数自然界有机物质，甚至包括许多人造物质。而真菌在陆地或水域生境里都被认为是植物性物质的主要分解者，因为在这些类群中广泛分布着木质素和纤维素的降解酶，而在细菌中具有这种能力的种类为数不多，仅在极端缺氧条件下细菌才在分解过程中成为主要因素。因此细菌在极端温度下和缺氧条件时才是优势腐生种类，其中包括在

动物肠胃中的细菌。

参加分解过程的生物类群，按它们的功能可以分为微型植物（真菌和细菌）和微型动物（微型、中型和大型动物）。

在图 3-5 中，微型动物区系包括原生动物线虫类、轮虫类、熊虫类和体型极小的弹尾目和蝎类。它们虽然形成统一类群，但并不干预落叶层的碎化过程，其次，中型动物区系如弹尾目昆虫，无翅类昆虫、螨类、线蚓类，多数双翅目幼虫和一些小型鞘翅目昆虫，它们虽然也能侵犯完整的落叶层，但是它们对落叶层总的降解作用并不显著。在分解过程中，它们的主要作用在于调节微生物种群和对大型动物区系的粪便起改造作用。中型动物中的白蚂蚁却是唯一例外，它们存在与否直接影响该生态系统中的能流和物质流的去向。至于大型动物，包括各种取食落叶层的节肢动物如倍足目（千足类）等足类，端足类和昆虫，也涉及软体动物（如蛞蝓和蜗牛）和较大型的蚯蚓。这些动物都干预植物剩余的扯碎作用和再分配作用。它们的出现很显然影响分解过程的途径和直接影响土壤的结构。

至于水域中的分解群落的成员与陆生生态系的分解群落的成员当然不一样，各有不同的名称，但其作用不外起粉碎、搜集、刮削、取食或捕食等功能。

有机物质的性质与分解过程密切相关，它包括物理和化学两个方面的性质，分解作用的速度与资源的性质有关，例如糖类、半纤维素、纤维素、木质素、蜡类和酚分别在一年内损失物质的成分 99%，90%，75%，50%，25% 和 10%。

被分解作用后的营养成分随动植物资源不同而不同。一般说，动物和微生物的组织含营养成分最高；其次为禾本科和

落叶林的落叶，针叶林和杜鹃花科的落叶；最低为木质部。
分解过程的食物网中各种动植物体形、宽度的分类见图3-5。

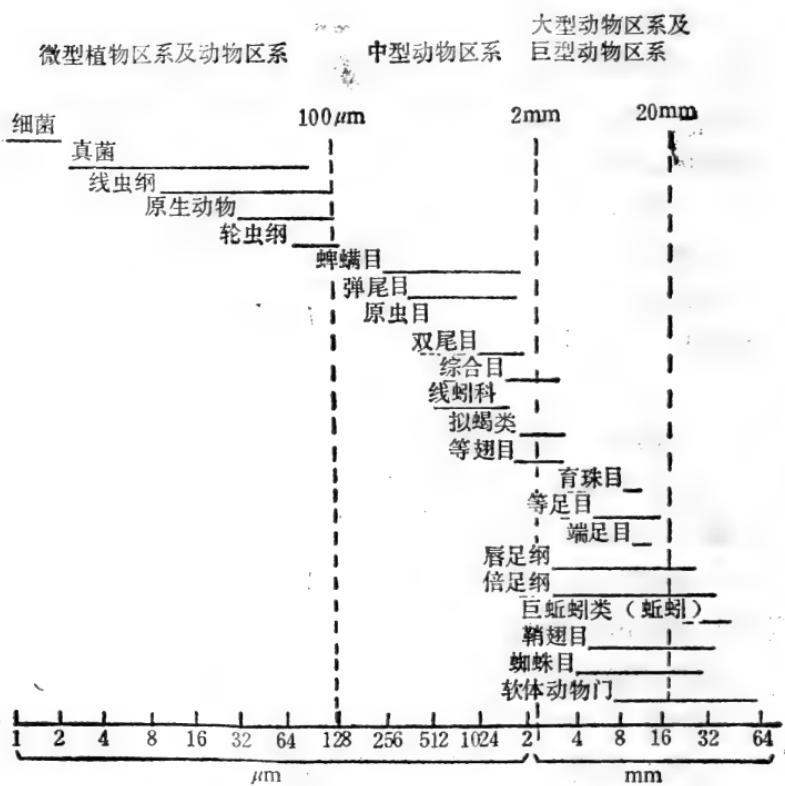


图3-5 分解过程的食物网中各种动植物体形、宽度的分类图

有机废物可以区分为两大类：固体废物（家庭垃圾、木材废物、作物剩余物等）和污水。作物的残渣和家畜粪便在田间就地作为有机肥加以处理。未经处理的垃圾有的直接排放到江河或运到远处的河口。由于城市迅速发展，生活水平提高，随之而来的有机废物也加倍增多，因此城市废物的处理

成为亟待解决的问题。

在许多国家中，污水多数加以处理以减少富集现象，避免环境污染和保证供水的卫生。城市和乡镇的垃圾最主要的处理方法有将垃圾挖坑深埋或高温火焚。但由于埋地有限，火焚投资过大，将来很可能会较多增设堆肥处理工厂和污水处理工程。

所谓污水指的是人畜排泄物，食品加工厂的废物，含有金属盐类和有机聚合物的工业废水以及大量生活排污水和径流污水的总称。污水的成分千差万别，随地区不同和雨量多寡而异。固体废物含有高质量的资源，在正常处理情况下，某些生物降解潜力很大。大多数现代污物处理工厂实际上就是利用微生物将有机废物转化为气体产物或有机剩余物。

(四) 生物种群数量变动主要统计参数

生物种群是指在一定空间中同种个体总和。它一般具有三个特征：1. 具有一定的分布区域。2. 种群数量变化。3. 具有相同的遗传特征。宏观地看，人们对整个种群数量变动远较个体的生死存亡重视得多。世人之所以特别重视环境保护，其原因之一，乃是眼看人为的环境干扰使许多珍稀禽兽不断消失。因此，在研究环境生物学中必须对生物种群内在机理、规律有所了解，这样才能估计出环境的变动将对生物产生的影响，首先是种群数量变动的影响。那么，影响生物种群数量变动的主要统计参数是哪些呢？

1. 出生率。生物之所以存在到今天，能延续到明天，是通过繁殖后代来实现的。生物的这一能力称为生殖力。衡量生物体生殖能力称为生殖率。生殖能力一般指雌性个体所

具有的生理机能，无性繁殖种群则无性别之分，衡量生物种群繁殖后代的速率单位为出生率，它是单位时间中种群增加的个体数除以该时间开始时原种群总数，是个无量纲单位，常用字母 b 表示。生殖率、出生率在特定情况下又可分出特殊年龄组生殖率、实际出生率和生态出生率等。

2. 死亡率。单位时间中种群内死亡的个体数占种群总数比例。它可用 d 表示。它还分为最低死亡率，生态死亡率等。所谓生态死亡率，系指在特定环境中单位时间内死亡个数占种群总数比例。环境的突变常使某些生物种群死亡率增高或降低。

3. 内禀增长率。通常定义 $r = b - d$ 为内禀增长率。对于具有稳定年龄结构组配的种群，它可看作给定外界条件下的种群瞬间增长 rate。

4. 有限自然增长率。对于世代隔离明显的种群，人们把后一代种群数 N_{t+1} 和前一代种群数 N_t 的比 λ ，即

$$\lambda = \frac{N_{t+1}}{N_t}$$
 称做有限自然增长率。马尔萨斯 (Malthus) 即是用此式来说明人类人口数是以几何级数增长。 r 与 λ 近似关系式为： $\lambda = e^r$ 。若 λ 在各代中均等值，则有关系式 $N_t = \lambda^t N_0$ 或 $N_t = N_0 e^{rt}$ 。此即种群按指数增长的方程式。

5. 环境容纳量。我们知道，任何有限空间中，由于资源，栖息地等问题都只能容许一定密度的生物种群存在。无论是马尔萨斯时代的人口观抑或近十多年来地球极限的讨论，其内容均是讨论在有限空间中究竟能养活多少人。实际上，这就是环境容纳量概念，它一般用 K 表示。

精确估计上述统计参数对弄清种群数量变动有特殊意义。为了了解种群动态，人们还常采用生命表和存活曲线。

生命表起源于人口统计学，17世纪中叶，英国人格兰特（Graunt）用表格形式记载了一些地区在特定时间中出生的一定数量人口怎样随时间变化而减少的现象。后来人们称这类表格为生命表，在人寿保险业中得到广泛应用。生态学家又把这种表引用到生态学中，人们可从生命表中找出种群死亡变化、种群的特性和影响，生命表有静态和动态两种。静态生命表指人们在特定时间中调查所得数据编制成表。如人口普查所得数据编制的生命表即属静态生命表。动态生命表是指跟踪特定时间中出生的个体数随时间变化而变化的规律 X 编制成表。生命表一般包括如下内容：年龄 X ； X 年龄开始时人数 n_x ； X 年龄至 $X+1$ 个年龄间死亡数 d_x ；死亡率 q_x ；从 X 年龄开始时还活着个体数占初始种群数比例 l_x ； X 年龄的个体期望寿命 e_x ；自 X 年龄开始存活到 $X+1$ 年龄间种群个体平均存活数 L_x ；从 X 年龄开始各个个体存活年龄总和 T_x 。其形式如表 3-4

表 3-4 一种生物种群生命表

X	n_x	d_x	q_x	l_x	L_x	T_x	\bar{l}_x
0	100	30	0.30	1.0	85	240	2.4
1	70	20	0.29	0.7	60	155	2.2
2	50	10	0.20	0.5	45	95	1.9
3	40	20	0.50	0.4	30	40	1
4	20	20	1.00	0.2	10	10	0.5
5	0	0	0	0	0	0	0

实用上，人们常把种群数量大小随时间变化用图表示出来，称为种群总体曲线。人们特别感兴趣的是某年龄组种群数量变化和年龄关系曲线，这种曲线在环境发生变化时往往

能立即给出某种信息。例如，特定年龄组害虫变化情况等。这类曲线称存活曲线，它也有静态和动态两种，与静态、动态生命表相对应。图 3-6 是这类曲线的比较。

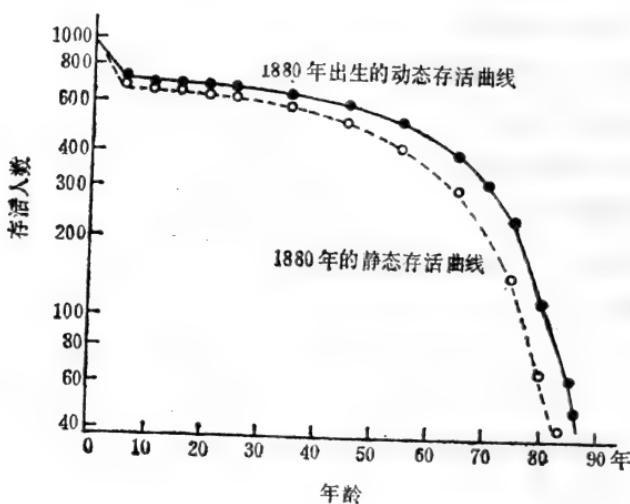
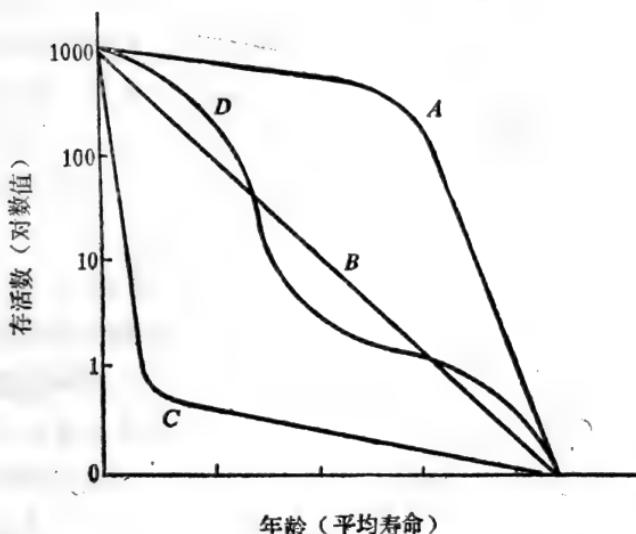


图 3-6 英国 1880 年出生的男人群的动态存活曲线与 1880 年调查
的男人静态曲线的比较 (Krebs, 1978)

人们相当多地利用存活曲线来研究生物种群死亡、进化类型。如图 3-7 是三种典型存活曲线。*A*型，称为凸型，种群中多数个体能尽其天年，即多数因年老死亡；*B*型，表明在单位时间中死亡为常值；*C*型，死亡多发生在幼体，种群中活到生理寿命的很少。自然，实际生物种群存活曲线未必全同此，但多多少少都近似于此三种类型。如高等动物多属*A*型，昆虫、鱼类多属*C*型，鸟类多近似于*B*型。在野外，因环境变化在不同年龄中死亡变化波动很大，如图*D*型，它可看做夹在*A*、*B*、*C*型中某两种存活曲线间过渡型。



（五）种群结构

种群结构的研究乃是种群生态学研究中另一大类，它包括种群分布、年龄结构、性比等。

普通生物分布可分为：随机分布、均匀分布、聚集分布

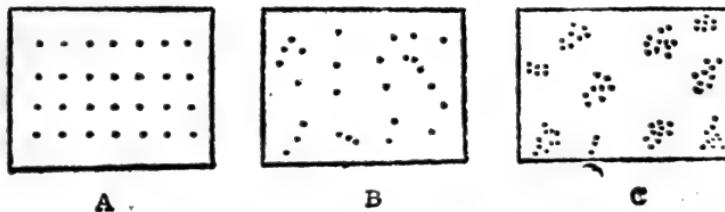


图3-8 种群分布类型
A. 随机分布； B. 均匀分布； C. 聚集分布。

等。（如图3-8）在自然状态下，均匀分布较少见，但也

有，它见于具有领域制的凶猛鱼类，英吉利海峡沙滩上的櫻蛤是这方面最好例子。在实践中，作物多是有规则栽培，是均匀分布的典型。随机分布在天然环境中也少见。更多见到的是各类聚集分布和三种分布的不同结合。当人们想较准确测定种群密度又无法做到一个个计数时，用抽样调查获得种群分布型就显得十分重要。但弄清分布型并非易事，生物种群有形形色色分布型，搞不好，事半功倍甚至弄错分布型，导致种群数量估计错误。应注意，我们说的分布并非特指某种个体处于空间某位置，在统计学上，它指随机变量的数值以不同的频率分配到许多可能的等级中的方式。

与分布相对应的是群聚与隔离，除个别生物种群外，生物各个体迟早会形成不等类群。这类聚合往往是生殖过程或死亡过程的结果，不少情况乃是各类环境因子变化反应的回答。如某些生物在低温时群聚可提高小生境的温度等微气候以利生存。通常情况下，群聚能提高种群个体存活能力，例如植物群体较单株抗风能力明显提高。但群聚往往增加了种内竞争。与群聚对立的是隔离，它是因种内竞争，资源缺乏或是因其它生存、生理需要而引起的直接对抗。我国珍责动物熊猫在成年期基本上是过着隔离生活的。

生物种群研究中另一类统计学特征是年龄结构和性比。一般生物，当谈及出生率、死亡率时势必涉及物种的年龄结构和性比。因为出生率、死亡率与生物的性比、卵、种、幼虫、幼畜、幼苗、生物的发育前期和高等动物的绝育期、生物衰老期紧密相关，由此可看出种群的增长能力（无性繁殖的生物，某些二分裂低等生物除外）。例如在人口研究中，由1982年我国普查人口所得年龄结构，知道我国年龄结构尚属前进型，必须控制人口增长。相反地，一些老年型国家，

则关心本国人口增长。

种群的年龄结构稳定性可以反映出种群数量变动处于环境容纳量附近。这时的出生率与死亡率近于相等。当年龄结构稳定性遭到破坏时，往往显示出该种群的某个环境因子起了突变，从而引起个体死亡数增加，生殖力减弱等，或是反过来种群数量增加，生殖力增强等。

性比指种群内雌雄性之比，除无性繁殖外，我们定义有性繁殖中具有繁殖后代能力的个体为雌性。不同生物种群性比可有很大差别，例如蜂群，有效雄性比有效雌性（蜂后）多多了。就一般高等动物而言，性比值多围绕在1:1间波动。人类常利用一些手段人为改变某些生物种群性比来干涉该生物种群繁殖能力。如在生物防治中释放不育的雄性害虫即是一例。

（六）种群数量变动

任何一种生物种群数量变动无非属于增长、稳定、衰减

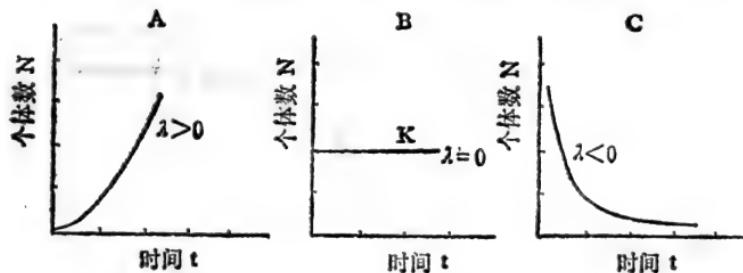


图3-9 物种数量变动方程 $N_t = N_0 e^{\lambda t}$
在A. $\lambda > 0$, B. $\lambda = 0$, C. $\lambda < 0$ 时情况

三种情况。当物种数量变动方程为 $N_t = N_0 e^{\lambda t}$ 时，这三种情况对应于 $\lambda > 0$, $\lambda = 0$, $\lambda < 0$ ，见图(3-9)。物种在

其自身进化过程中自有其适应环境的能力。在较为稳定的环境中， λ 往往是在0附近颤动，种群数量处于环境容纳量 K 附近。当环境中某些因子发生突变时，包括季节性气候变化时，上述情况就要改观。例如春夏季时，许多昆虫种群的 $\lambda > 0$ ，而秋冬时多 $\lambda < 0$ 。在富营养化的湖泊中，氯磷的过量可使某些藻类爆发，将出现图3-9中A情形，在养分耗尽后将出现B情况。但在自然界中存在的多数单种生物种群，其数量变动模型并非以指数增长。在稳定的环境条件下，呈现各种各样数量变动模型，其中有一种单种种群数量变动方程在各种文献上较多见，这就是表达式为

$N = \frac{K}{1 + e^{a - rt}}$ 的方程，大家多称之为罗辑斯谛 (Logistic)

方程，这里 a 为常数， K 、 r 意义如前述，这一表达式乃是方程

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(\frac{K - N}{K} \right)$$

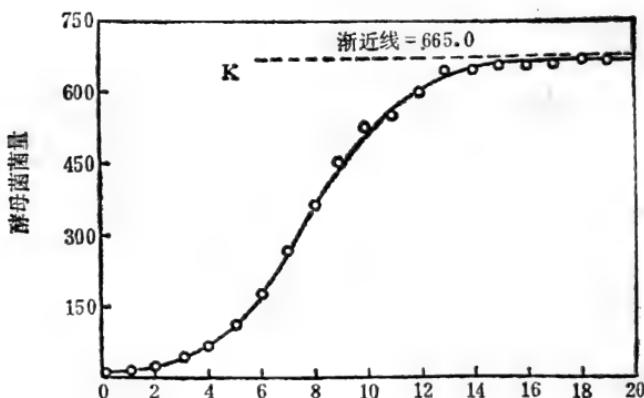


图3-10 酵母菌在培养基中增长 (Pearl, 1927年)

的解。图3-10是酵母菌增长方程曲线，它近似于Logistic方程曲线，这时 $K = 665$, $r = 0.5355$, $a = 4.1896$,

$$N = \frac{655}{1 + e^{4.1896 - 0.5355}}$$

罗辑斯谛方程说明，任一物种增长都自有其极限，最终将趋于稳定平衡点。在单种种群增长模型介绍中，指数型增长最简单，但它往往只存在某些种群特定的时间、环境中，实践中并不多见。而罗辑斯谛方程相对来说较多见些。至于单种种群数量变动中更为复杂，更接近种群数量变动实际情况方程有诸如具有时滞的差分、微分方程、随机性方程等。图3-11列出单种种群数量变动的几种可能曲线。由这些

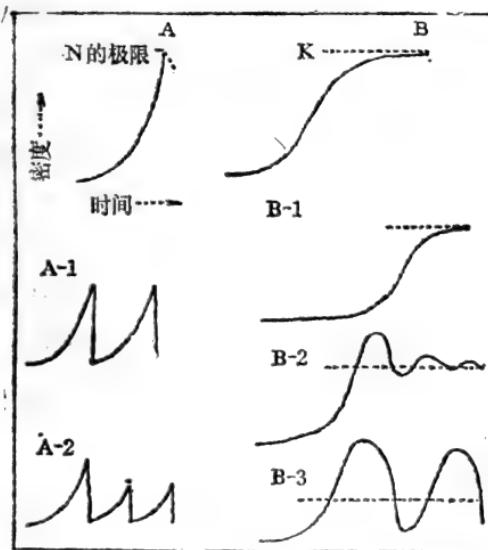


图3-11 单种种群变动的几种类型(A. 指数型; B. 罗辑斯谛型; A-1, A-2是某些指数型增长后固有波动; B-1, B-2, B-3 表示具有不同时滞的种群的数量变动。) 曲线不难看到，无论哪种种群都不能无限增长，这是什么原因呢？一般人认为，单种种群增长之所以受限制，一是因密

度制约引起的，另一种是非密度制约引起的。前者种群数量变化与密度有关，后者种群数量变化主要因环境因子或其他因子的影响。通常，结构复杂、较稳定的不易受环境影响的生物易受生物因素的调节及物种密度的影响；而种群结构简单、系统脆弱的种群增长则易受外界环境变动控制，如资源、病理作用等。有的生物种群环境容纳量 K 呈周期性波动。这常有两种情况，一是季节性变化，二是年变化。季节性变化常因环境因子促成，而年变化则多出自种群自身调节的反馈作用。自然，这一情况并非绝对，有不少种群数量年变化与环境因子波动有关。

生物在进化过程中具有不同的生态特征，根据种群动态可分成两大类。对于密度较为稳定，常处于环境容纳量 K 值附近的生物种群，称为 K 选择，也称为 K 对策者，它常具有子代死亡率低、生殖力低、寿命长、个体大的特点。较适于稳定的栖息生境，在存活曲线上属A型曲线（见图3-7），许多哺乳动物多属此类。另一类为 r 选择，也称 r 对策者，种群密度不稳定，稳态的少，数量变动起伏大，多是高出生、高死亡、短寿命、个体小、扩散能力强且较易适应多变的生境，它的存活曲线如图3-7中C曲线，多数昆虫、细菌属此类。在 $r-K$ 之间还有各类生物种群选择者的连续谱。

（七）种间关系

竞争、捕食（或寄生）、互惠共生是物种间最主要关系。在繁多的生物种群中，种间关系或属于上述三大类，或是接近于三大类中某一类，或介于各类之间。

所谓种间竞争，乃是两种或多个物种因竞争同一对象而

对它们自己种群数量变动，存活、生长起不利的影响作用。这些对象常指空间、食物等。互惠共生则是两个或两个以上种群在同一生境共存时对对方种群存活、生长、数量变动均有有利的行为。捕食则是一个物种为其他物种的食物，而寄生者的营养来源、栖所建立在寄主机体上，所以寄生者与寄主关系类似于捕食者与被捕食者关系。所有这些种间关系，在早期的生态学著作中除了做定性的描述外还做了定量变化的讨论。著名的有本世纪20~30年代间洛特卡—沃尔特拉（Lotka—Volterra）提出的竞争、捕食等方程，这些方程多由微分方程组成，如两个竞争种群方程组为：

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \frac{K_1 - N_1 - \alpha N_2}{K_1}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \frac{K_2 - N_2 - \beta N_1}{K_2}$$

这里 N_1 , N_2 , r_1 , r_2 , K_1 , K_2 , 分别为物种1, 2的种群数量, 种群内禀增长率, 环境容纳量。 α , β 为正的常数。

近10多年来，人们对互惠共生模型也进行了讨论。所有种间模型，多数限于理论上探讨，与实际应用还有一段距离，并且多是两个种间关系的研究。近年来也有一些研究者对三个种间关系做了计算机模拟与研究。对于多种群间关系，理论上可以写出这类方程，但由于这些方程均是非线性的，只能得到些近似解或定性分析，分析解几乎不可得。原则上可得到如下方程组，设有n个竞争种和m个捕食种，它们种群数量以 N_1, \dots, N_n , P_1, \dots, P_m 表示，则可得如下形式多种群关系方程组。它实际上已接近于描述生物群落水平关系式。

$$\frac{dN_1}{dt} = N_1 G_1 \quad (N_1, \dots, N_n, \quad P_1, \dots, P_m)$$

\vdots

$$\frac{dN_n}{dt} = N_n G_n \quad (N_1, \dots, N_n, \quad P_1, \dots, P_m)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = P_1 Q_1 \quad (N_1, \dots, N_n, \quad P_1, \dots, P_m)$$

\vdots

$$\frac{dP_m}{dt} = P_m Q_m \quad (N_1, \dots, N_n, \quad P_1, \dots, P_m)$$

四 环境对生物动态的影响

(一) 概 述

众所周知，生物是环境的产物，它产生于特定的环境，同时反过来又对环境产生影响。它的主要物质基础乃是由自然界中多种元素构成的核酸和蛋白质。它的能量来源主要来源于太阳辐射能和少量化学能。生物具有自我更新能力和不断地与外界进行物质、能量代谢机能，由生物生存的特定环境提供物质与能量，所以生物体是一开放系统。生物体新陈代谢机能包括两部分，一是同化作用，它是生物体从周围环境中摄取必要的营养物质与能量，然后转换成自身的物质以及以物质的形式贮存起来的能量；另一方面是异化作用，它是同化作用的相反过程，把组成自身的物质和以物质形式贮存起来的能量分解释放出来以维持生命活动或排出体外。这两过程在生命活动中表现为光合作用、营养、呼吸、合成、运输、排泄和调节。核酸与蛋白质主要是由环境提供的碳、氢、氧等元素组成的有机化合物。由此可知，环境对生物动态有至关重要的影响。但环境是由许多因子相互作用影响而成，是由物质、非物质和生物体自身组成的系统。日常生活经验告诉我们，任何有生命物体对环境因子忍受都有一界限，超过这类界限的上限或下限都将导致该生物的消亡。生物体在允许的环境因子界限内的反应一般是有选择的独立反应。例如生物机体对外部作用物反应和细胞膜的选择性通透作用。应注意的是生物体的这种反应是依赖于生物体内的机能状况，它是在自身的调节机制作用下进行的，不同于非生

命体被动、直接反应。由于生物体是开放系统，所以大家所熟悉的热力学第二定律指出一个孤立的系统熵常增不减原理对生物体并不适用。生命过程总是不断地进行新陈代谢使熵值趋于零。换句话说，正常的生物体总是向有序程度递增的方向发展，任一生物，当达到最大所能忍受的熵值，意味着机体趋于失调、紊乱无序，预示着生命即将结束。

正常的生物体总是向有序程度递增方向发展，使熵值尽量减少，这可追溯到生命起源假设上。估计地球的年龄约46亿年，依照某些地质化石判断，生命约起源于35亿年前。一般假设认为，原始大气和海洋一起，许多杂乱无序的元素在水分子参预下利用地球凝聚释放的热能和太阳能，放电等作用先合成无机分子，再形成有机小分子，进一步聚合为生物大分子氨基酸和核苷酸等（现在，天然蛋白质中含有的20种氨基酸几乎全能用多种元素合成）。这就为核酸、蛋白质的形成奠定了基础。氨基酸、核苷酸等不同的有序排列形成不同的蛋白质、核酸。从分子水平观察，生物的许多病害、功能失调恰恰就是氨基酸、核苷酸长链排列稍微改变而引起的。此外，研究表明，糖类、脂肪、卟啉类、胡萝卜素类均与蛋白质、核酸一样由各类元素相互作用而成，它们的分子结构均是严格有序的排列。在它们所构成的生物体中各有确定的位置，任何这种位置差错，有序性的紊乱，熵增加到一定程度都将危及生物的生命活动。在生物体内由各种元素形成的有机分子除上述种类外，还有ATP（三磷酸腺苷）及各种酶等。所有这些物质使生物体不断地与周围环境进行物质和能量交换，使生物生生不息。它们与环境诸因子紧密相关，显示出生物体中各种元素含量与地壳中各元素含量的相适应。这由人类自身的一些构造也可看出。例如人体血液中若干元

素含量与地壳岩石里该元素含量的丰盛度有紧密相关性。图4-1则是表示生物体新陈代谢过程中与环境诸因子的关系。

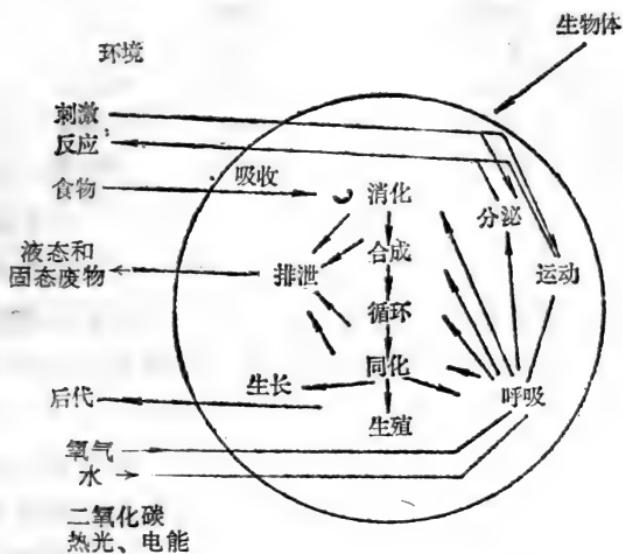


图4-1 生物与环境间相互依赖关系

生命结构和功能的基本单位是细胞，我们用图4-2表示细胞组织形成过程。在细胞学说中，认为生物是由细胞和细胞的产物组成（当然也有例外，如某些粘菌常是合胞体，它的原生质并不分隔成细胞，又如病毒是比细胞更小的生命单位。还有些生物学家认为原生动物并非由细胞组成的。所有这些例外还处在争论中。）。各种生物细胞在结构和组成上是相似的，细胞的活动反映了生物机能、新细胞由母细胞一分为二而形成，生物害病首先起因于细胞的机能紊乱。

生命活动中不仅同化作用、异化作用受制于环境，而且

生殖、遗传、变异的变化均依赖于环境。生物体既产生于环境，同时又是环境的一部分，它与环境诸因素保持着一定平

合成需要酶、核酸、三磷酸腺苷、其它辅酶

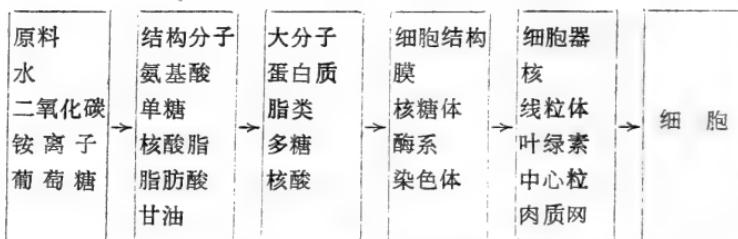


图4-2 有组织的细胞形成过程

衡（即生态平衡），这是一种处于不断运动状态的动态平衡。环境的构成和状态的变动都将影响到生物体生理活动直到存亡关系，生物靠机体内调节或变异来适应环境变化。当环境变化超过调节容许限度，生命活动就停止。从原始生命到现在众多的化石和生物说明了生物体随环境变化而变化，从单一性到多样性，从简单到复杂，从低等到高等，有的物种被淘汰，有的则应运而生，从而又影响了环境。人类已能严重影响环境变化，而环境变化反过来又作用于人类，这在后面还要专门谈及。

进化学说告诉人们怎样由无生命物质到有生命物质，生命怎样随环境的变化而进化。现有的生物就是自然选择结果，是“基因型的非随机的差别繁殖力”结果。现代进化论是从细胞、个体、种群角度来讨论。而分子生物学、生理学、细胞学、比较解剖学、古生物学、生物地理学等从各方面都提供了充足证据，证明生物由低级到高级、由简单到复杂的进化过程，并且速度越来越快。这既有生物自身作用原因，也有环境因素作用的影响。虽然变异与遗传决定了生物

进化类型，但它必须与环境相适应 否则变异结果是死亡。生物的复杂性、多样性恰恰是对应于环境的复杂性、多样性。

生物环境发生变化将导致或是生物的物质循环；或是生物的能量循环；或是生物机体的适应性；或是生物链的变动，从而使生物动态发生变动。这种变动从目前技术水平可观察到分子水平、个体水平和种群水平的变动。一般来说环境变动总是先从分子水平影响起，先细胞后个体，最后是种群甚至群落水平。但也有的直接先从个体水平开始，例如捕食，一口吞食就是一个个体；也有的是从这几种水平混合表现出受环境变动影响的。涉及到环境对生物动态影响往往是复杂的，应进行深入分析才能清楚受环境变动影响的主要因素。

生物体生存的环境可分为两大类，一类是生物，它有物种间、种内，食物网关系和竞争、寄生、捕食互惠共生等等关系，另一类是理化因素，包括地理、气候、资源、环境组成等。

（二）利比赫法则，限制因子概念，生物和地理分布、气候关系

我们已知道生物在一定生境中生息、延续就需要环境提供基本物质能量和进行物质能量交换。生物因种类、生存状况差别对环境物质、能量利用量有所差别。1884年贾斯特斯·利比赫在研究植物时发现，一般作物产量并非经常受到环境较容易满足的物质的限制，例如二氧化碳，而是受那些看起来需要量少但环境中常难以满足的物质，例如硼等微量元素的限制。于是提出“植物的生长取决于处在最小量状况

的营养量”的法则，这个法则也适用于其他种类生物，后人一般称为利比赫（Libig）最小因子法则。后来人们在研究生物的诸环境因子中发现，生物体对任一环境因子忍受都有一限度，有它的最大最小临界阈值，于是提出了耐性定律。这个定律指出生物所需的环境因子的数量或质量过多或不足都将引起生物的病变、衰退或死亡。现在人们以“限制因子”统称最小量定律和耐性定律中所指的最小量因子和最大量因子。这里应注意的是，对生物动态发生影响的若干环境因子之间联合变动的相互作用结果，可以改变生物对各环境因子量上下限阈值。因而在具体研究生物限制因子量时不仅需考虑在稳定状态下生物对个别环境因子变动的最大上下限，而且还需考虑若干环境因子同时变动或相互作用引起的生物对所能忍受的环境因子阈限值的变动，这后一种情况往往更经常发生在人类实践中，更应是人类注意的地方。

限制因子不仅泛指生物所需的各种营养物、元素，而且包括环境的温度、湿度、光照等物理量，现在则还包括各种人工合成化合物、污染物。一般来说限制因子不但有它的上下限，并且还有最适生长、发育范围或是最佳繁殖量值，例如图4-3表示物种对温度适应范围和最佳点。

生物可能对某一限制因子忍受上下限较宽，而对另一些限制因子忍受范围较窄。我们常会发现处在繁殖期中生物的种子、卵、胚胎、幼体、幼苗和个体对限制因子所能忍受的阈限指标就窄些。在自然环境中，往往有不少限制因子对生物不是处于如图4-3所示最佳状况，这时其他限制因子的阈限指标也会有所下降。因为许多生物并非处于最佳状态，这样许多似乎看起来不重要的因子往往显出它的重要性。在通常情况下，对限制因子上下限要求较宽的生物，分布就广些，

反之就窄些。由于生物既能影响环境，并能使自己适应环境，从而使生物对它的生存条件起限制作用的理化因素上下限可适当放宽，这种现象叫因子补偿作用，它使许多分布广阔的种具有各自适应地方性环境的最适度。对各种理化因子如温度、湿度等的变化可引起补偿作用，形成生理上或遗传上适应当地环境因子的生物。

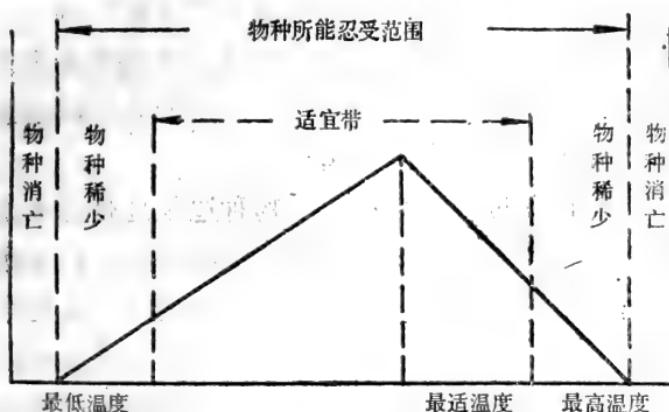


图4-3 物种与限制因子关系示意图

生物与各种环境因子间关系一般是复杂的。同一种生物在此地某些环境因子显得重要，在彼地可能并非重要。实践中，人们最感兴趣的是特定环境条件下起重要作用的生态因素，它应是该环境中生物的限制因子。例如，在陆地自然条件下，陆生生物氧的供应量一般是稳定且丰富的。然而在水中，水生生物的氧供应往往成为典型的限制因子，特别是某些水域被污染时往往有因缺氧使水域中水生生物遭灭顶之灾。

在环境遭受较大变动时，生物动态往往也随之大变动，这中间显然是限制因子起了作用，至于哪些限制因子起了主导作用则应放在具体环境下进行分析，否则往往会得出似是而非的结论。在进行这一分析时

1. 首先应分析生物在确定环境条件下对生命活动的某个时期，例如发育、生长或繁殖等起显著作用的环境因子，这些因子首先是临界因子。

2. 分析各因子对细胞、个体、种群以至群落如何起作用。

3. 在条件许可时可按照环境因子的梯度变化情况对生物影响状况进行考察，并且应考察多个“可疑”因子。因为只对一种环境因子状况进行考察会出现很大偏差甚至是错误的，这正如医生对病因进行判断，发高烧的人可以是感冒引起也可能是其他致命病原体引起。

4. 一个有效的方法是利用生物种边缘地带分布的状况研究生物的限制因子。例如某地原来生物兴盛，后来因某种原因，如栖息地受到污染或人为破坏使该地区的某些生物迁居于原来认为不适于该生物边缘居住地，这时往往可以对认为不适于该生物生存的限制因子进行校正或是对某物种最大边界分布区做进一步的确定。

5. 当某生物某一限制因子已确定，这时就应进一步进行定量定性因子分析进而建立模型预测。

任何生物在生息过程中多少总受限制因子作用。直观地看，若没有限制因子作用在某物种上，则该物种必将遍及世界，使世界成为单一种群统治了。生物的限制因子既有理化因子，又有生物因素，包括物种自身的种间、种内斗争，也是很重要的限制因子。所谓密度制约因素就是物种增长的限制因子。今天，人类活动已大大地影响了生物动态，使一些环境因子对不少生物来说已处于临界值。有人作粗略估计，现时因这种或那种限制因子作用或是联合作用使地球上平均每天有一种以上物种消失。所以我们在研究环境对生物动态

影响时限制因子作用应是重点对象。

地理分布和气候乃是某些环境因子的综合指标。首先，地球上生物生存时有它的基质。所谓基质乃是生物赖以生存的物质基础。陆上生物需依靠土壤、砂砾甚至岩石的基质或是间接地依靠这些基质。除一部分浮游生物以水为基质外，许多水生生物也依赖于水中土壤、砂砾、岩石等物质。这些基质除具有各自理化特性外，在地球上还处于不同的地理位置，即使相类似的基质，在不同地理位置，生物种类也可以有显著的差别。这里，不同地理位置的气候特征显然有极其重要的作用，而许多地方，地理位置就决定该地区气候的主要特征。例如处于高纬度地区一般是寒带区，低纬度地区多是热带。即使同一地区，海拔高度不同温度也有所差别，同地区的地形等差别也可以严重地影响温湿度，降水等气候因素。我们说海洋性气候，大陆性气候，沙漠气候等均与地理分布相关，这些已为常识。各种生物在一定的地理环境与气候中生存，说明生物自身适应于该环境物质、能量交换，是若干万年来自然选择和物种进化结果，是生物对温湿度、日照、生物链和基质特殊需要结果。例如在同一纬度区划中，沿海的岩石可固着各种藻类、贝类；而软体动物则多生活在具有砂砾的基底中；在浅水的淤泥区，可以生长多种的海参、海胆等。鱼类则漫游于河流、湖泊、海洋中；在陆上可以麦香十里，绿草如茵；有的地方则古木参天，种种飞禽走兽奔走其中；有的则是寸草不生，荒漠千里，只是个别绿洲点缀其间。这里地理环境与气候相辅相成，形成不同类型的生物群落与种群。又如对虾在生长、发育的不同季节有选择地在某一海域中回游、栖息。我国东海的鲥鱼、大西洋的鲑鱼则是生长在海洋中却定期溯流进入溪流中产卵，在它们身上

都打有很强的地理分布的烙印，且在不同生长期中具有不同的区域性。同样，世界上现存珍禽异兽对地理环境、气候要求均比较特殊。这类珍禽异兽，有的即使人类为它创造特殊的生长、发育、传种接代的小生境条件，但其中有的却仍然因很小的限制因素没有注意到，可以使该生物生长、发育或繁殖功败垂成。

不少生物活动的特殊性直接与日照、温湿度等气候条件相关。例如热带性动植物在自然界条件下难于向高纬度地区移动；湿润地区生物分布也难于扩大到沙漠地区；而有的物种虽然两处均能生存，但在一处能生长发育却不能繁殖，在另处却能多代传种接代，这往往与气候有关。又如我国海南岛水稻可一年三熟，而东北延边地区只能单季种植。粘虫随着气候、食物的季节变化而作远距离迁飞，在东南亚、闽粤地区可以繁殖多代，而在大小兴安岭地区只能繁殖一代，有的则只生长不繁殖。候鸟的迁飞主要是由气候因素引起，自然也有食物资源因素在内。许多植物从一纬度带迁到另一纬度地区，常因温度、日照问题而引起不结果、不繁殖问题。气候、天气的变化影响生物的发育、繁殖、存活等，也可引起滞育等现象。

正是生物与地理分布、气候密切相关，才能在相同地质层中出现种数回异品系，才能在世界各地形成丰富多彩的生物画卷，各地区才具有各地显著特色的特产。不少生物只能在特定地理环境条件下，结合特殊气候，才能欣欣向荣地生长。许多种生物分布范围明显地受地理分布、气候状况所限制。至今，人们对有的生物特殊要求的地理环境、气候条件的机理还不清楚。然而对于大多数的地理分布、气候因素进行解剖分析后发现，它们往往不过是许多更小环境因子联合

作用的结果，有的可能只不过是其中一很微小环境因子作用的结果，即个别限制因子作用的结果。总之，由高山峻岭到平原，从乡村到城市，从内地到海滨，从沙漠到湖滨，形形色色的生物种群、群落的形成都与当地地理分布、气候直接相关，它们受这种、那种限制因子作用，或是受若干限制因子联合作用。

(三) 温度对生物动态的影响

温度对生物的影响是明显的。由分子水平分析，温度对细胞影响的主要表现在高温使生物体内蛋白质凝固，酶系统和线粒体受到破坏以及生物体内生化组成的变化。而低温可引起细胞脱水、渗透性改变、蛋白质沉淀、体液冻结结晶、原生质受到破坏及其他不可逆转的变化。温度强烈波动可使生物体生理结构紊乱、脱水、甚至机械损伤。过高的温度和过低的温度都可导致细胞死亡直至生物体的死亡。在一定高温下，细菌也难存活，把食物加热到100℃的目的即在于杀菌。较低的温度可以抑制细菌生长、发育、繁殖，更低的温度也能起灭菌作用，这就是冷冻保鲜的道理。一般来说，活的有机个体存活温度多是0~50℃，但也有相当数量生物存活温度超过0~50℃界限。例如有的温泉鱼可生活在水温100℃中，据报导，美国科学家从太平洋采回细菌在压力锅中培养，在温度高达250℃时繁殖几小时即达几百倍以上。近年还有报道说，在太平洋海底温度高达400℃的热水区发现靠有毒气体繁殖的管虫、大蛤和细菌。

生物体一般都有它生长发育的最佳温度和临界温度。对多数变温动物更是如此。例如两栖类的青蛙在7~8℃即进

入蛰眠状态，在20~30℃间则异常活跃。许多生物在冷的季节即冬眠，减少代谢率；有的生物在干热的季节或夏季进入昏眠，即夏眠。冬眠或夏眠时不进食，心跳率、呼吸率很低，消耗体内脂肪以使得能量代谢率很低。生物对上下限的适应有极大差别，沙漠中的植物可以忍受较高温度，而寒带的苔藓即使在冰天雪地中也能很好传宗接代。多数脊椎动物所能忍受的温度上限在41~44℃，海中无脊椎动物则忍受更低的上限温度，大约30℃。昆虫类较高，可达44~45℃；有些生物象缓步虫、线虫在不干燥情况下可慢慢冷却到-253℃的低温，几乎逼近最低温标也不死亡；有的生物温度适应范围极广，例如生活在裸露岩石上的硬蜱，在山岩上白天忍受60℃高温，夜里在0℃时也安然度过。有的则极窄，成为明显的限制因子，例如奇桨剑水蚤生存温度要求为23~29℃。在周围环境温度发生变化时，特别是超过动物所能忍受的上下限温度时，有的则钻穴以避寒、热，例如：田鼠、旅鼠过冬掘地做洞以避寒，荒漠中动物在炎夏钻地以避热。有的则是因温度变化而迁徙，或冬眠、夏眠。当然，在温度变化中所有这些生物动态的变动，有的表面看起来是温度，实则可能是另外限制因素起了作用。例如食物网的变化，它种生物或其他理化因子因温度变化而发生的变化对生物个体、种群起了刺激作用，促使他们采取措施以抵御极端温度给它们带来的种种不利条件和威胁。

就生物个体来说，每个生物的生育、生长、发育、存活都有一个起点温度。大家知道，在化学反应中温度起了重要作用，通常，化学反应速度随着温度提高，速度明显加快。生物的新陈代谢过程就是一个复杂的化学反应过程，它影响着生物的生长、发育、生殖机能。由于生化反应中有各种酶

参加，所以比一般化学反应中因温度增值反应速度增快来得复杂。只是在最适生存温度内，提高温度才能对生物的生长、发育、繁殖有明显的作用。在正常的生物生存温度下，温度每变化一度对代谢过程、发育、生长都有很大作用。即使恒温物种。例如人类，处于热带的人种较寒带的人种发育来得早；有些昆虫在一定温度下可发生滞育（滞育是指生物发育到一定阶段时，须经一定条件才能发育到下一阶段），例如金凤蝶的蛹；对于变温动物，比比皆是。人们对许多常见生物种群已有较深入的有关温度与活力、形态、生长、运动、繁殖等的研究，例如有的学者指出寒冷地方恒温动物种比暖和地方相同种个体体形大。早在1938年就有人列表说明荒漠蝗虫在不同温度下的活力，指出荒漠蝗虫冻僵的开始温度为 4.9°C ，触角和附节末端活动微弱时的温度为 10.5°C ，爬行迟缓温度为 18°C ，正常活动的温度为 20.1°C ，异常活跃时的温度为 32.6°C ，强烈兴奋时的温度为 41.8°C ，热晕开始温度为 48°C ，致死温度为 50.5°C 。又如据徐州6~7月份田间观察，该时间中产于地中的粘虫卵因高温几乎都不孵化。

法国学者雷奥米尔 Reaumur 从实践中观察变温动物发育生长过程，总结出一条有效积温法则，于1735年提出，这个法则实际上是从植物学中推广而来并与之相类似。在植物学中有效积温系指植物体在生长发育过程中必须从外界摄取一定热量才能完成某一阶段发育。雷奥米尔将它用到变温动物中，假设动物发育所需时间为 N （单位时间，例如日）， T 是单位时间中温度， T_0 为该生物体发育时所需的最低温度，称为发育临界温度或发育起点温度。则该生物发育、生长所必需的有效积温为

$$K = N(T - T_0)$$

日常生活中，我们看到母鸡孵小鸡，必需给以最低发育温度和有效积温，小鸡才能破壳而出。如果我们令发育速度

为 $V = \frac{1}{N}$ ，则由上式可得

$$T = T_0 + KV = T_0 + \frac{K}{N}$$

它表示在发育温度内，温度与发育历期成双曲线关系，如图4-4所示

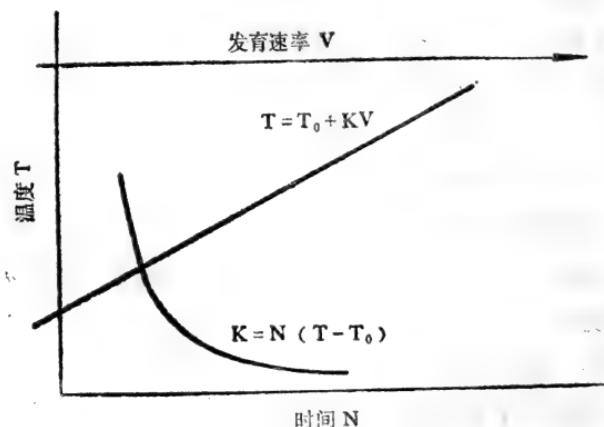


图4-4 温度 T 与历期 N 、发育速率 V 关系曲线

由图4-4看到，发育速度与温度关系呈直线关系。实际上，它只是近似直线。在多数情况下，当生物感受超过极限温度或是临近极限温度时，因生长发育受阻，甚至死亡，它的积温曲线表现出明显的弯曲。在植物学中，可以证明，在合适的光强度和正常的二氧化碳供应条件下，当环境温度变动较小时，一般植物光合作用生成物Q和有效积温 $\Sigma T \Delta t$ (T 是在 Δt 时间内植物所处的环境温度 T_t 减去植物生长发育的

临界温度 T_0 ，即 $T = T_4 - T_0$ 成比例。就一般陆生植物的光合作用速率而言，随着温度升高而增强，到25℃左右达峰值，如果温度继续升高，光合作用速率反而下降。这里均是以环境适合植物正常生长状态为条件。例如，低于某一光强度，增加温度并不能提高光合作用速率。植物生长发育的极限温度差别很大，某些生长在寒带的植物种属，在 $T_4 = 0$ ℃时，仍能进行光合作用，而在75℃的温泉，可以观察到某些藻类还能继续进行光合作用。但通常植物的生长发育温度为0~35℃，高等植物发育生长温度下限多在5~6℃。多数温带植物，光合作用最佳温度在10~35℃。图4-5是说明温度对光合作用的影响，在一定的二氧化碳的供给量下，温度高低成为明显的限制因子，这由曲线B、C的比较就可看到。由上述事实不难清楚，在合适的光强下，温度同样可以成为限制因子。

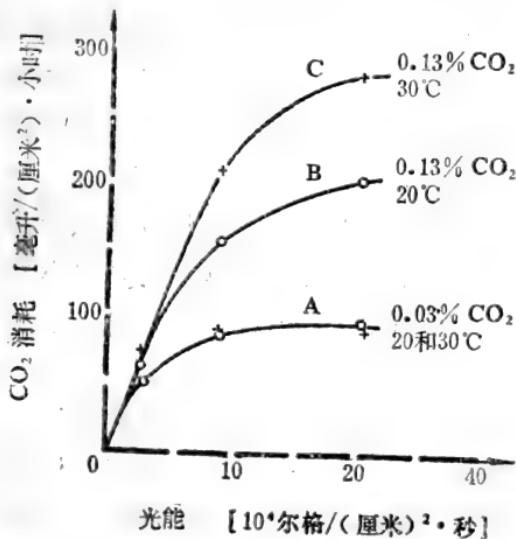


图4-5 不同温度下植物叶片的光合作用率，(Gaastra, 1963)

昼夜变温对植物的生长、发育、果实品质均有很大影响，植物适应于昼夜温度变化称为温周期。在适合于植物生长、发育的正常昼夜变温范围内能提高种子的萌发率。这是因为降温后可增加氧在细胞中溶解度，温度交替可提高细胞通透性，促进萌发，昼夜变温大小影响某些植物开花。例如甘薯温差大，开花多。火炬松幼苗在允许的变温范围内，昼夜温差越大，生长越好，相等时生长最差；水稻在昼夜温差大的地方种植，稻株健壮、米质好。果树也有类似情况。某些植物的果实蛋白质含量和昼夜温差关系密切。例如有人曾给出小麦麦粒蛋白质含量和昼夜温差关系式 $B = 12.9A + 2.1$ 。这里 B 是麦粒蛋白质含量百分率， A 为平均昼夜温差值。在植物生长发育的合适温度范围内，温周期对植物之所以起了有利作用乃是因白天较高温度利于植物的光合作用，而夜间的低温使植物呼吸作用减弱、能量消耗降低、净积累增加。超过植物生存所能忍受的上下限极端温度均能使植物受害。这是因为超限的低温使植物酶系统紊乱，抗性降低、ADP减少导致植物体内一系列的生理生化活动失调或受损以致死亡。某些植物在冰点以下时可使原生质失水、蛋白质沉淀。而高温可使植物光合作用和呼吸作用间失去平衡，使后者耗能超过前者，从而饥饿致死。但须指出，某些植物恰需一段低温阶段才能在来年春夏季生长、发育、开花、结果。如桃、杏、李等。

动物有效积温法则在恒温与变温两种不同条件下对特定物种进行测定时测得值有所差别。即使同是恒温条件，因温度不同所得积温数也不同。从这一现象中可看出，生物生化过程在合适温度下，提高温度明显地可增加发育速度，有与化学反应相类似性质。在有效积温法则中也有个别例外情

况，如日本日高与田中于1969年发表的报告指出，松柏锯角蜂在木曾驹山岳的高山带取食伏松叶的幼虫品系，只能在昼夜有温差情况下才能发育。如果是处在恒温下，那么不管其他环境条件如何，也不管哪种恒温，均不能发育。表4-1是粘虫发育起点温度与有效积温。

表 4-1 粘虫发育起点温度与有效积温

虫 名	发育阶段	发育起点 温度(℃)	有效积温 (日度)
粘虫	卵	13.1±1.1	45.3
	幼虫	7.7±1.3	402.1
	蛹	12.6±0.5	121.0
	成虫	9.0±0.8	111.0
	一个世代	9.6±1.0	685.2

在研究不同品系种群的个体发育与温度关系中，自上世纪末到本世纪中叶就有不少人陆续提出一些经验公式，例如戴维森在研究黄猩猩果蝇时得到如下发育速率公式

$$V = \frac{C}{1 + e^{a-bT}}$$

这里 V 是发育反应时间， C 为最高反应速度， T 为温度，此公式也称为罗辑斯谛公式，他认为果蝇在15—27℃间发育速率方程为

$$V = \frac{1}{H} = 0.0034 (T - 11) \quad H\text{为小时数, 图}$$

4-6中 L 直线表示 V 方程曲线。

近年来，此类公式越来越多，有生化反应性质的化学反应公式，温度与发育比率关系公式等。

由于温度对生物活力、生长、发育、繁殖均有明显影

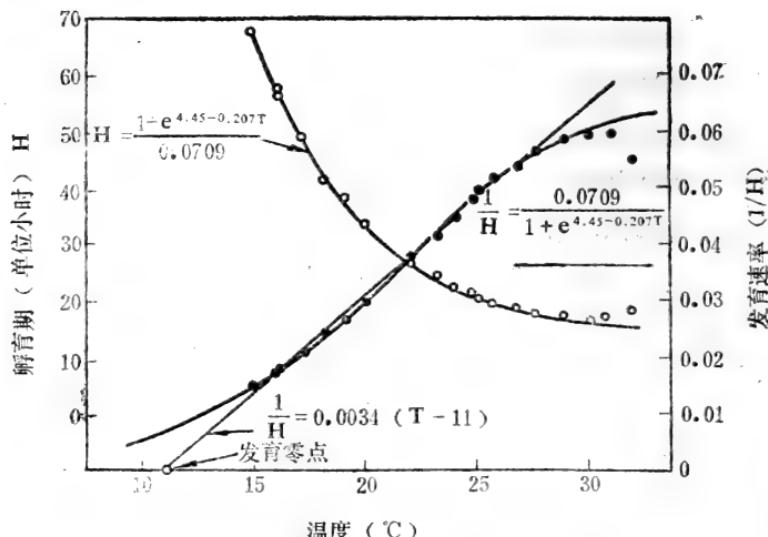


图4-6 温度对于黄猩猩果蝇卵发育的影响(Davidson, 1944)

响，从而对整个生物种群数量变动势必发生影响。正因此，突然天气变化（寒潮或是高温）常可使某些生物毁于一旦，或使某些生物种群大爆发。这种大起大落往往还结合了其它环境条件变化。例如湿度、光照、化学成分等。

(四) 湿度、水、降水、雪、风等与生物动态关系

湿度是表示大气中含水蒸气的指数，环境的湿度受昼夜气温的影响，受季节、植被、地貌构造、地理位置等因素的影响。生物需要水才能维持生命活动，生物体内含水的多寡，直接和环境的湿度有关。湿度对生物的繁殖、生殖发育、生长形态、构造、行为和地理分布等多少都有关系。处于存活状态的动物，原生质中通常含水70~90%。当然也有例外，例如：水母含水98%，黄粉蝶幼虫只含水50%。多数无脊椎

动物和两栖类生活在潮湿地方和水中，并且主要在夜间活动，有的昆虫当土表湿度较低时，即深入土层深处（例如金龟子）。不少沙漠动物，例如软体动物、节肢动物等在夏季相对湿度剧烈下降，就采取夏眠方式来对付环境变化。有的昆虫在某一发育阶段干旱时，即发生滞育，当湿度适宜时才开始发育。

生物对湿度适应范围差别甚大，有的可以忍受较大范围湿度变动，有的在小范围变动时就丧生或是对生物行为动态起严重抑制作用。例如衣鱼的幼体在相对湿度小于7%，大于9%区域中即告死亡；鼠蚤在30℃，相对湿度80~90%，平均寿命达150小时；在相对湿度为27%，同样温度下却只能生活27小时。有一种粉螟，RH（相对湿度）=20%，雌虫生卵16个，RH=40~50%，生卵28个，RH=90~100%，生卵1779个。表4-2列出了大地老虎卵在不同温湿度下的死亡率。

表 4-2 大地老虎卵在不同温湿度组合下的死亡率（江苏南京）

温度(℃)	相对湿度	死亡率		
		50%	70%	90%
20		36.67	0	13.5
25		43.46	0	2.5
30		80.00	7.5	97.5

发育速度与湿度明显相关，例如飞蝗的发育速度在相对湿度低于70%时，发育速度稳定增加，而高于70%后则明显下降。

日本的小泉清明依据豆象与湿度关系给出豆象发育速度

与湿度关系的经验公式

$$V = \frac{100}{y + E(100 - H) + b}$$

这里 b 是常数， V 是发育速度， y 是虫体蒸发系数， E 是当时温度下空气中最大蒸汽压， H 为相对湿度。

根据植物生长所适应的环境湿度差别，可分为旱生、水生、中生植物。植物的气孔蒸腾直接与大气中湿度大小有

关。它可用公式 $E_s = \frac{c_i - c_a}{r_a + r_s}$ 表达。式中 E_s 、 c_i 、 c_a 、 r_a 、 r_s

分别为气孔蒸腾(克/厘米²·秒)，叶片内部和大气中水分含量(克/厘米³)，叶气孔阻力和边缘阻力(秒/厘米)。在不同环境湿度中生长的植物，叶面和内部构造很不相同。如适应干燥气候的仙人掌类植物，叶子退化消失，减少蒸腾，茎内有发达贮水组织。当旱生植物长期遭受低洼涝湿时将遭害而死亡。

温湿度的联合作用对生物有极严重的影响，巴克斯顿(Buxton)等对西非采采蝇研究提供了温湿度对生物的繁殖、存活联合影响的精确实例(见表4-3)。

因温湿度间存在明显的相关，所以不同温湿度组合出现奇妙结果。于是就出现温湿度联合作用的复合指标。例如，温湿系数定义为

$$Q = \frac{RH}{T}$$

许多生物工作者利用这个指标时对一些特定生物种群动态进行预测。 T 、 RH 分别是当时当地温湿度。

众所周知，水是维持生命活动的重要因子，一切有生命

表 4-3 不同温度与不同湿度对采采蝇存活、取食与出生的影响
(Buxton 和 Lewis , 1934年)

温度 (℃)	相对湿度(%)	存活天数	每餐取血量(mg)	每百个雌虫日产幼虫数
30	11	<10	6	0.3
30	19	20—25	7	0.9
30	44	25—30	11	2.8
30	65	<5	10	0
30	88	<5	2	0
24	11	—	—	<1
24	44	—	—	<1

的物体新陈代谢仅在有水参预情况下才能正常进行，没有不含水的活的生物体，不同生物对水需求与适应性有很大差异，因此才分成水生生物和陆生生物。鱼游水底，离开水就成枯鱼，而人在水下没有其它设备也活不成。动物失水达一定限度时就进入昏迷以至死亡。失水动物一方面可由体外补偿水分，另方面尽量减少体内水分消耗。有些动物可由体表吸收水分，两栖类还可吸取空气中水分。自然，动物主要是由饮水及食物中取得水分。有些动物可以取得代谢水，例如骆驼吃进食物同化为脂肪储存起来，遇到无水喝的时候靠脂肪分解获得代谢水维持水分的消耗。无论是陆生还是水生生物，均有对水分调节的能力，在陆上，生活适应能力越强，水分调节能力也越强，许多陆生动物都有防止水分丧失机制和利用代谢水的能力。对于水生生物，淡水生活种类多是排出过多水分和防止过多水分的进入，而海水生活种类有保留水分和调节盐分的能力。

植物生长对水的需求有个上下限，超过下限，植物萎蔫、生长停止、枯萎；越过上限、根系缺氧、烂根；仅当适

中范围植物才长得好。

降雨既可以补充某些池塘、湖泊、溪流水量，又可以改变土壤湿度。通过湿度、水量变化影响生物物种。降雨量多少直接影响某些动植物种群生态诸特征，特别是降雨降雪直接涉及到生物生境，使生物赖以生存的能量、营养物质来源、环境基质或食物链发生变化从而影响生物动态，例如长期干旱可使颗粒无收，大牲畜饥饿致死。图4-7是降雨量与飞蝗关系。由图上曲线可见，降雨量大，蝗虫数下降，其关系是负相关。原因可能是因雨量大，水位上升，淹没蝗虫基地；阴雨天，湿度大，蝗虫发育慢，并且雨量多，蝗虫天敌

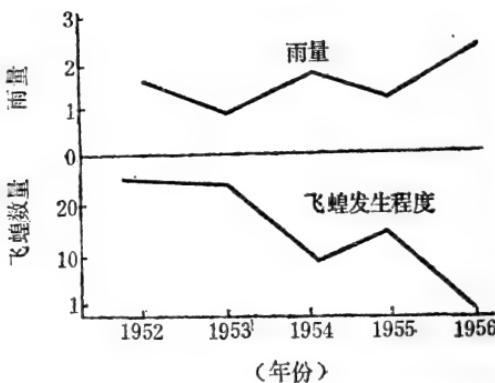


图4-7 1952~56年安徽嘉山村湖蝗区降雨量与飞蝗关系(楼亦槐, 1959)

蟾蜍、线虫也增加，从而蝗虫量减少。可见，降雨量大小影响生物动态现象的后面可能还有因降雨而引起的限制因素发生了作用。人们在研究降雨量作用后提出若干指标，下面介绍几个。

1. 旱涝指数 $I = R - \frac{M}{\sigma}$

R 是年或月降雨量， M 是平均降雨量， σ 系标准差。

$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{N}}$ ，这里 x_i , \bar{X} 是日降雨量或旬降雨量和日平均降雨量或旬平均降雨量， N 是天数或旬数。

2. 蒸发系数 $P = \frac{R}{E}$

R 意义同上， E 为对应的地面蒸发量。

由于这些指数说明了降雨程度，所以据此往往能判断出某些自然种群因受降雨因素影响在不同分布区变动的情况。许多生物常常同时受降水量、温度联合作用，在一定温度下降雨量显示出重要性，或一定降雨量后显示温度重要性。于是提出一些降雨量与温度的联合作用指标。

3. 温积湿度的度系数 $Q = \frac{R}{\Sigma(T-C)}$

R 为年或月、旬降雨量， T 为年或月、旬平均温度， C 系发育起点温度。

实际上，当我们讲到某年降雨情况时往往就预示了某年作物或某些生物动态。而常年降雨量大小往往可以确定了该地区是湿润还是干燥，从而也确定了该地区生物特色与动态，它也常常是某些生物分布的限制因素。至于降雨与温湿度联合作用则更是决定了许多种群数量的趋势、生态特征、生死存亡和分布区划。

雪对生物影响也很显著，多数生物在降雪季节里生长缓慢或处于冬眠状态，冬小麦利用雪被很好地度过冬季，雪莲却在冰天雪地里开花争妍。苏联学者把一些动物分成喜雪动物，喜在雪下生活动物和嫌雪动物。由于雪地环境活动受到

雪的抑制作用,积雪常可以明显地影响生物数量变动。喜雪动物喜欢大积雪,而这却给嫌雪动物带来灾难性的结果。如图4-8是苏联瑙莫夫(Haymow)于1948年报告的雪上生活的田鼠、雪下生活的旅鼠和家鼠在南乌克兰草原越冬的成活率与积雪厚度关系。由图中我们可以看到,家鼠与积雪厚度成正相关。畜牧业或全年以牧草饲养动物、放牧动物的只能在无雪或少雪的草原、高原活动才合适。降雪的大小对来年化冻后土壤潮湿程度有直接相关。积雪深浅对雪地动物和雪下生物的繁殖、行为、动态均有很大影响。而在雪地活动的动物则常具有它们特殊的形态特征。

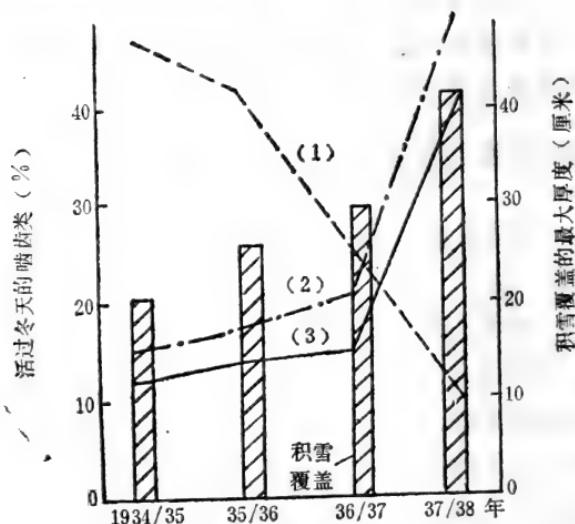


图4-8 啮齿类动物在乌克兰草原越冬(10—5月)与积雪复盖厚度的相关图。(1)库尔干家鼠(2)普通田鼠(3)草原旅鼠(H.Haymow, 1948)

风、气流等影响生物的分布和活动。在经常刮强风的地方,植物品种多是耐抗大风,飞行动物也多限于善于在强风中飞行的若干种。风可以是重要传播工具,许多淡水生物在

水域干涸时，常随休眠期的底物或沉积物随风扩散。这可解释淡水小生物广阔分布的道理。实际上，即使大型水生生物，例如大型蛙鱼被强旋风“迁居”10~20公里外再降“雨”并非少见；陆生小型生物和植物种子如蒲公英随风漂泊、扩散更非少见。风对一些鸟类迁飞起了重大作用，风对粘虫、飞蝗等远距离迁飞更是起了决定性作用。长期生活在多风地方的动物也有它的特征形态，例如高山大风地区昆虫翅短。大风、强旋风加上温、湿度变化可以给某些动植物带来灾难。许多生物在大风中死于非命，干热风可以使某些作物严重减产。总之，作为环境因子的风对于那些不适于在多风环境中生活的种就是一个限制因素。

（五）光对生物动态影响

光是生物极为重要的环境因子，太阳辐射到地球的两种能的形式是光和热。可以说地球上绝大部分的生物能量来源是直接或间接地与光源发生关系。植物以光合作用形式取得能量，才能以生命形式存在下去。通过植物光合作用，光能才变成生物中食物链最初形态。光影响生物的理化作用，由此才产生出多种多样的功能。光通过植物特殊的构造，通过被植物所吸收的无机质、营养物的作用，使光能转化为化学能，并在植物中以淀粉、糖类等有机物质储存起来，同时还释放出对绝大部分生物生命攸关的氧。因此，可以说地球上除靠化学能生存的某些菌类外，绝大部分生物没有光能就不存在。然而光对原生质的直接照射可以引起死亡，许多生物光照过量或不足都将直接影响生物生态诸特征。生物许多构造和行为的特点都和光有关系。因此，光是许多生物，尤其

是植物的限制因子。应当指出，太阳辐射的电磁光谱有无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等，只有一部分光被植物所吸收（红光与蓝光），绝大部分为大气和地球所吸收，又以辐射热形式反射到宇宙空间。被大气所吸收的有些光谱对生物是有害的，例如波长2000~2750埃的紫外线具有极强的伤害生物能力，生物只是利用了其中的有用部分。

不同光波长、颜色、光强度和光照时间对生物生态均有重要意义。例如波长在2000~3000埃的紫外线光谱表现出强有力杀菌作用，能杀死空气中和物体表面微生物。红外线的吸收可以使体温升高。光照强度对于植物光合作用按直接增长即光强度增加光合作用也增加直到光饱和的水平。如果光强度再提高，这时对许多植物来说光合作用量反而下降，但对多数谷物生产则不起抑制作用。太阳辐射和光合作用的关系如图4-9。由图可看到浮游生物在受过强的光强照射时，光合作用受到很大抑制作用，因此浮游植物产量高峰常是海水下层而非海水表面。在高光照情况下，酶的光-氧化作用使合成作用下降，而急速呼吸用去大量光合产物，蛋白质合成也降低。只是碳水化合物百分率较高，这是热带高蛋白农作物产量不高原因之一。光合作用过程是一个非常复杂的过程，它包括约100种酶控制的化学反应步骤，它的一些步骤至今还不清楚，并且无法复制。它包括有光反应和暗反应过程，并且光合作用一般必须经暗反应过程才产生磷酸甘油酸（PGA），再进入代谢库形成植物生命活动所必需的有机物。

光对生物的许多形态、特征、代谢行为、生活周期、生长、发育、繁殖、地理分布、换毛等均有影响。

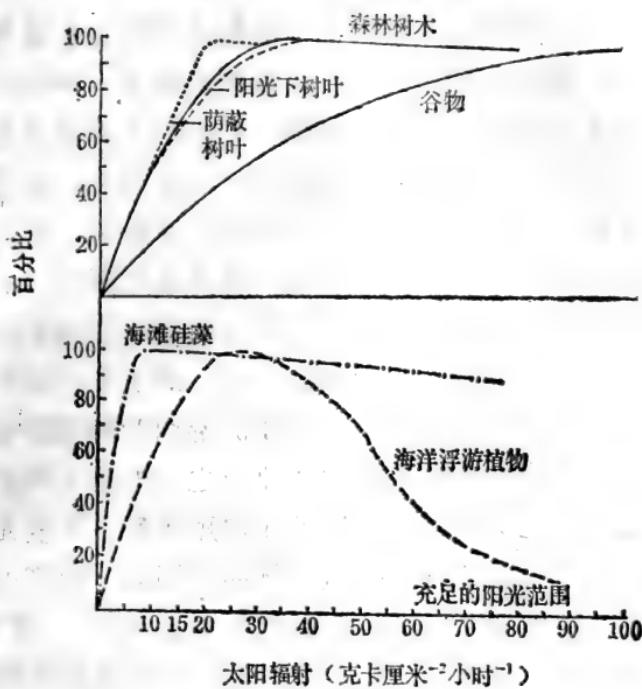


图4-9 不同植物的光—光合作用曲线(Odum, 1970)

植物至少有三种色素对光产生反应。出土的幼芽转绿是因原叶绿素对光的反应结果；植物中一个至今未知的色素对光的反应控制着植物的向光性；植物光敏素对红光的反应控制了一些植物种子的萌发。例如没有红光的照射，可使一些种子不发芽，而远红外光却能控制莴苣种子的萌发。有的植物处在强光照下即呈萎蔫，有的则喜欢强光照。植物可分成喜光植物和耐阴植物，有的植物光照时数必须长过该种的临界值才开花，称为长日照植物。有的光照时数则必须短过该种的临界值才开花，称为短日照植物。还有昼夜长短比例接近于相等时才开花的中日照植物。人们利用各种植物的

不同光照特点，人为地控制开花时间，以供观赏。由于光照影响植物的光合作用，从而影响了植物各期的生长发育。

动物昼夜交尾、产卵、产仔、取食、栖息、体色、迁徙及某些种的生长发育均受光照影响。不同的光周期可引起或解除生物的滞育。地下无脊椎动物几乎均是避光，高纬度地区短日照意味着不适于多数生物发育的冬季降临。不同动物具有不同临界光周期，例如玉米螟的临界光照期为13小时30分。临界光周期还与温湿度有关。光强度变化可引起某些生物运动状态变化。蚂蟥等有追求阴影的习性，蝗虫在迁徙中途如遇乌云蔽日则停止飞行，河里幼鳗在溯游回产卵地皆夜伏昼动。温带地区昆虫分布受限制主要原因之一即是高纬度、低纬度地区光照在昆虫发育期间过长或过短所致，改变光周期可以使某些生物提前或错后繁殖。例如美洲鲑一般产卵于秋天，但如在实验室条件下，人为地延长白天时间，夏季缩短，仿照秋季光照条件，那么在夏季就可以提前使美洲鲑繁殖。有的动物寻找配偶时通过光传导来完成，如夜蛾类雄性发现异性乃是它具有接受远红外光的波导管结构。光还可对动物活动起干扰作用，如夜里用电筒光线照住青蛙，青蛙即可一动不动待擒。生活在弱光环境中的生物，例如土壤、仓库中的昆虫如果突然增加它们生活环境的光强，它们活动将受明显的抑制。反之，生活在强光环境中的生物，光线突然变弱，生物的生长、发育、行为等活动也将受到抑制。飞蛾的趋光性促使人设计出不同波长的诱蛾灯，五月角金龟飞出时间完全决定于日落时间。法国学者曾指出，法国国立公园的叉角羚羊种群数量变动取决于前一年的降水量和动物受紫外线的量。光照度对许多昆虫运动也发生影响。早在1931年一学者从对蜜蜂趋光性的研究中提出如下经验方程

$$R = CE^m$$

这里 $R = \frac{n}{N-n}$ 表示种群趋光性大小， $E = \frac{e}{e_0} m$ 、 C 为常值， e 为变化的光强（单位勒克司） e_0 为标准的白光强度， n 是用变动光诱得的蛾数， N 为实验时昆虫总数。若令 $c = e^b$ ， b 为常值则上式可写为

$$\log R = m \log E + b$$

可见光照强度变动严重影响蛾类运动。

（六）环境中某些无机物质对生物的影响

通常我们把生物圈看成由岩石圈、水圈和气圈组成。对于大气，除了含有大量水蒸气外，在不受干扰情况下，它的组成成分比较稳定，按体积计算，大致有 78% 的 N_2 、21% 的 O_2 和 0.03% 的 CO_2 。此外，还有 H_2S 、 CH_4 等。我们知道生命活动中均有 O_2 、 CO_2 参预循环。 CO_2 是植物光合作用所必需的原料，碳是一切生命物体的基本构成物， CO_2 还是大气层外紫外线辐射的屏障，大量的 CO_2 对动物可起抑制生长、发育作用，甚至可使其昏迷与死亡。粮食保藏中采取自然调气法来抑制虫害发生所依据的原理，即是让昆虫呼吸耗氧产生大量 CO_2 而抑制害虫发生。氧则是多数动物所必需的（除厌氧生物体外）氧在生物体的新陈代谢活动中起的主要作用是作为氢受体而形成水。氧对脂肪、糖、蛋白质的氧化作用是动物获得能量的来源。因此 O_2 、 CO_2 变化对生物起一定限制作用。一些实验指出，适当降低 O_2 浓度可使光合作用率增加，有人估计，如果大气中的 CO_2 比例较现在适当增加，同时适当降低 O_2 浓度，阔叶植物将进一步发展。实验表明，适当增加空气中 CO_2 对某些植物（大部分的 C_3 植物）增产明显，但

对另些植物（多数C₄植物）增产甚微，甚至干重减少。例如在1000ppm的CO₂中生长的水稻、大豆可比对照区（300ppm）水稻、大豆的单株干重分别增重110%和150%；而杂交高粱、玉米在同样情况下只增重7%和2%，在2500ppmCO₂区中，玉米可比对照区减产6%。

对于动物，氧明显是限制因子。在一定高度处，氧不足可妨碍动物发育、生长、及减低家畜的繁殖力，使具有休眠期的动物昏迷加速到来，对于人类则能引起高山反应。许多动物分布地难于进入一定高度的地方，除其他因素外，氧不足是很重要的因素。代谢水平因缺氧而明显降低。不同动物对氧含量变化敏感程度不同，可分为对氧含量严格要求和适于不同氧含量中生活的种。动物严重缺氧可引起窒息而死亡。动物需氧量一般还与温度有关，这是因温度高，代谢水平增强，所以氧需要量就提高。O₂对需氧微生物往往是一很强烈限制因素，因缺氧使得在土壤较深层或大动物体内的物质分解速度下降。

O₂和CO₂在水中溶解性与空气中含量比较差别很大。在淡水中，O₂占溶于水中气体35%，而在海水只占约25%。如果与空气中含氧量比较，一升空气含O₂210毫升，而一升淡水含O₂不超过10毫升。因此对于许多水生动物，氧是个很强的限制因子。水中氧的来源一是空气扩散，另一个是水生植物的光合作用。借助于风和水的流动，氧在水中扩散较快些，否则很慢。而光线透射对光合作用产生氧是一个重要因素，水生生物分布与氧分布有密切关系。水中O₂浓度一般来说随季节、空间、昼夜、温度、水层流动、盐度等因素变化而变化，而且还与生活于其中的生物数量和性质有关。综合这几种指标可把不同湖泊特性分成几类。一类是水色透明呈

兰色的深湖泊，其中鱼类多是需氧高的鱼类，产量不高；一类是深度较浅，因细菌分解活动剧烈而使水色呈绿色，这类湖生长着需 O_2 量不大的鱼类，鱼产量较高；再有一类因含有大量腐植酸使水呈酸性成褐色，这种湖水生生物较少。现在也有许多湖泊受污染成“死湖”。从这里可以看出 O_2 在水生生物中可显著地成为限制因子。水生动物对 O_2 的忍受程度差别很大，由每升含 O_2 7~11毫升到每升只需含 O_2 0.5毫升。例如鳟鱼当含 O_2 低于5毫升/升时无法存活，而鲤鱼可生存于含 O_2 量为0.5毫升/升的水中。海水中 CO_2 量（游离或结合状态）可达40~50毫升/升。海洋中 CO_2 主要是在海洋碳酸盐系统中。海水 CO_2 含量可以是大气中 CO_2 含量的150倍。水中大量碳酸盐不仅是水生生物营养物质的来源，而且可影响水环中氢离子浓度。当水中增加适量的 CO_2 时，可加速光合作用和许多生物发育过程。但是鱼类对高浓度 CO_2 忍受性有限，如果水中含有大量非结合的 CO_2 ，可使鱼死亡。高浓度的 CO_2 和低浓度的 O_2 对一些水生动物起限制因子作用。 CO_2 也参预生成某些无脊椎动物的外壳骨骼、甲壳等石灰质结构。

生命活动中所必需的盐类称为生物盐，利比赫法则原来所指的最小量就是指这些盐中稀少且变化的一类盐。氮和磷酸盐是最重要的，其次是钾、钙、硫、镁等。在所有生命活动中，大约需要40种左右元素，一般称需要量较大元素为常量营养物质，称需要量虽少却非要不可的为微量营养物质。无论是常量或微量，对于生命活动所必需的元素缺一不可，缺少个别元素就会使生理机能出毛病以至死亡。这些物质的各种化合物形式存在于自然界并提供给生物生命活动需要。如果缺少某个元素就往往成为生物种群在该地区分布的限制因子。表4-4列举了若干种对植物生理活动起作用的

表 4-4 植物生理活动中必需的元素及其作用

元 素	在植物生理活动中作用
碳 (C) 氧 (O) 氢 (H)	构成植物骨架，是制造纤维、细胞膜、脂肪、淀粉、蛋白质等的主要材料。
氮 (N)	制造氨基酸、蛋白质等的主要材料，还是合成生理上起重要作用的化合物，如各种酶的基本材料。
硫 (S)	
镁 (Mg)	参预植物体内磷酸运转，为叶绿体成分。
钙 (Ca)	维持原生质并参预细胞形成。
钾 (K)	参预光合作用，蛋白质形成。
铁 (Fe)	对铜、锰起拮抗作用，参预叶绿体形成
锰 (Mn)	参预叶绿体形成及光合作用，参预维生素 C 形成
锌 (Zn)	为氨基酸，叶绿体形成中必需的物质
铜 (Cu)	利用液态氨帮助叶绿体吸收二氧化碳
钼 (Mo)	参预维生素 C 的形成并帮助细菌固氮
氯 (Cl)	参预光合作用
硼 (B)	促进糖运转与细胞分裂。钙的利用及水解碳水化合物，氮的代谢等。
钒 (V)	参预光合作用

此外。钠 (Na) 为植物所必需的观点开始建立，钴 (Co) 被认为对固氮菌，根瘤菌和固定游离态氮的蓝绿藻所必需。硅 (Si) 被认为为水稻所必需。

元素与功能。一般来说：碳、氮、磷、氢、氧等是有机体合成作用不可缺少、需要量较多的元素。碘是脊椎动物所必需的，软体动物和脊椎动物均需大量钙。又如锰、铁、氯、锌、钒是光合作用所必需的，钼、硼、钴、铁是氮代谢所必需的，而其他新陈代谢所必需的如锰、硼、钴、铜、硅等许多微量元素起着催化剂作用，非它不可。但不管那个必需元素，当供给量太少就可成为限制因子，太多也会成为限制因子。有些元素生物需要量不大，但缺少或多了非出毛病不可，例如克山病、大脖子病就是缺乏微量元素所致。某些植物缺乏微量元素即生长受阻，还有一类在生命过程中作用尚未确定的元素，如钴、汞、镉。不过它们在低浓度时就对许多生物体有毒却已确定。它们在各种土壤中的分布与成为生物限制因素则因地而异。对种群水平，一个显然的事实，个体数目增加自然受环境营养供给所限制，当某种元素或营养物质的供给成为问题时，该因素就成为该种群增长的明显限制因素。原因很简单，在某种量值供应是一定时，个体数目增加就使分到各个体量值减少了，这样由个体生长、发育、繁殖受

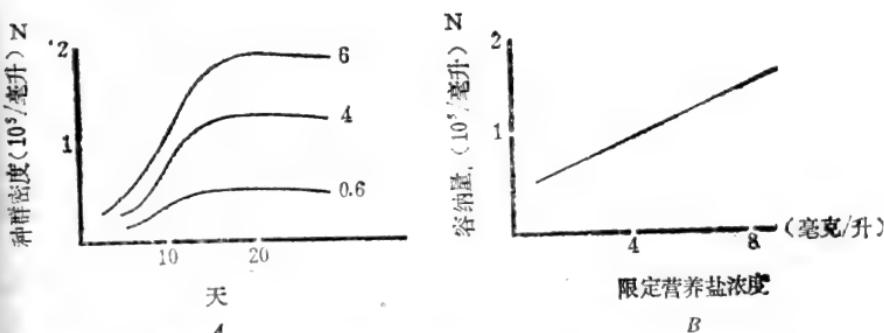


图4-10 藻类种群增长与限制性资源供给关系A. 在三种硝酸盐浓度下种群数量随时间变化情况。B. 种群环境容纳量和营养盐浓度关系(Caperon, 1967)

限制而推至整个种群受限制。

图4-10是硝酸盐供给量与藻类种群数目关系。当硝酸盐供给量浓度不足时，藻类种群发展明显受阻。而前面图4-5的A曲线说明，当CO₂浓度较低时，尽管温度范围变动较大，但光合作用量值并没有多大变动，这样种群的发展就受限制。

在远洋水体中平均含盐量达3.3~3.7%，在内海中差别甚多，如死海的高浓度含盐量使人浮于水面，在黑海则为1.2~1.9%。在盐的成分组成上远洋和淡水中差别也很大。例如硫酸盐、碳酸盐、氯化物在淡水与远洋中占盐类的比例分别为13.2%、79.9%、6.9%和10.8%、88.8%、0.4%。由此也就决定了淡水与远洋海中水生生物的分布差别。实际上，即使在不同盐度的海中，水生生物物种差别也很大。苏联学者曾对地中海、黑海、亚速海中生活的水生动物物种进行统计比较(见表4-5)，由表中可看到含盐量的差别对生物物种分布影响之大。

表 4-5 在不同盐度的海中动物物种数目

(按 Антипа, Воробьев, Виноградов)

海	盐度%	腔肠动物	多毛类 环节动物	甲壳动物	软体动物	棘皮动物	鱼	其他	总数
地中海	3.8	208	516	1174	145	101	519	1277	5282
黑海	1.7	44	123	290	123	4	121	405	1110
亚速海*	1.1	4	23	58	23	—	89	20	207

• 材料不完全。

各种生物对pH值忍受程度差别很大，眼虫能忍受的pH值为1.8~7.9，而纤毛虫却只能忍受pH值为7.7~8.0。一般生命只存在于pH值为3~8.5的环境中。大多数生物体只能适应较窄的pH值变动。水中酸碱度主要是依赖于O₂与CO₂的比

例，这就与不同季节和昼夜间光合作用有关，从而因季节、昼夜差别影响到水生动物在水中垂直分布的变动。

当水中溶解的硫化氢、碱石灰、硫酸盐、硝酸盐等含量超过一定比例时，会严重影响该地区水生生物种群的生长、发育、交尾、繁殖、遗传等。同样，大气中含某种有害气体或物质达到一定阈限值，也将危及许多生物种群的存亡。由于大气与水质都是许多生物赖以生存的基质，在自然过程中已稳定了若干亿年，当这些基质的成分有所改变时必将影响到生物的分布和存活。

（七）土壤、火等环境因子对生物的影响

陆生生物生存都直接或间接地依赖于土壤，土壤为植物提供了氮、磷等营养物质和水分。土壤的理化性质直接影响陆生生物的分布和结构、生存和繁殖。土壤生成过程中某些特征决定了陆生生物的某些性质。一些土中生活的动物，恰是借助土壤的某些特性完成了从水生到陆生的过渡。土壤和以土壤为基质的动植物种群形成多种多样的生态环境，构成生物圈的重要一环。

土壤是由地壳同化层和有生命的生物以及它们的尸体分解产物混合组成。土壤一方面是生物的环境因子，另方面又是生物的反作用产物，它是气候、生物、人类活动对地球表面母质作用的结果，是由固体（岩石碎片、无机及有机物微细团粒）、液体（土壤水分），气体（土壤中气体）三方面组成。土壤中物质、能量迁移、转化过程既有物理化学、生物化学过程，又有生物过程。例如有机物分解和腐殖质的形成，矿物质的分解和次粘土矿物合成，无机——有机物的淋溶

和沉积，土壤胶体对离子的吸附交换作用，土壤酸碱中和及缓冲作用，土壤氧化还原作用等。所有这些既受当地气候和植被作用，又受所处地形状况、母质类型、水流等因素影响。确定土壤类型主要应测定土壤结构：粗砂、细砂，壤土，粘土的百分比；矿物质、有机物的比例；营养交换能力，土壤的孔隙度、水分、含盐量、酸碱性和活的有机质等。所有这些都直接影响土壤中生物和地表植物生长、发育、繁殖、分布等特性。例如表4-6是大栗金龟卵期及孵化率与土壤含水量关系。土壤孔隙度、结构决定了水，空气的循环。土壤结构中较为重要的是粘土矿物和腐殖质组成，有机、无机胶体，复合体和微生物。所有这些往往决定了土壤通气性、湿度、热容量等。土壤一方面提供了地面植物光合作用的水、肥、气、热和各种植物赖以生长的环境条件，从而它给人类提供大部分初级生产力及由此而得到的次级生产力；另方面，土壤还具有代谢、同化外界进入土壤中各种物质的能力，使进入土壤的物质、能量转移、交换，再以另一种形式向外界环境输出。从这方面说，土壤在环境保护中又起极其重要作用。从而其影响是广泛的，土壤往往决定了赖以生存的动植

表 4-6 大栗金龟卵期及孵化中与土壤含水关系
(戴贤才, 1965年)

土壤含水 (%)	卵 数	孵化率 (%)	卵 期		
			最 长	最 短	平 均
风 干	30	0	—	—	—
10	30	16.67	66	53	59.6
20	30	93.33	62	47	50.3
30	30	83.33	63	47	50.1
40	30	56.67	64	45	48.2

物类型；土壤温度的季节性变化与昼夜变化，往往引起土壤中一些动物的垂直迁移。土壤中还广泛分布着各类微生物，据估计，一克土壤中有数十亿微生物，距土表15厘米厚的微生物重量一般有：细菌 $1.7 \sim 3.9$ 吨/公顷，丝状菌1.7吨/公顷，鞭毛虫及变形虫0.17吨/公顷，它们总重相当于土壤中有机物含量的2~3%左右。

不同的土壤类型和上面植被类型相辅相成紧密相关。土壤植被类型决定了在它上面生活的各种动物种类。土壤类型形形色色，按砂质就可分为砂质土、砂壤质土、轻壤土、中壤土、重壤土等；按植被类型则有草原、森林、荒漠、冻原等土壤类型，再加上水文气候因素决定了该地区生物类型分布状况。土壤是个明显的限制因子，沙漠地带生物与沼泽地生物动态迥异，即使在水域中，不同水域底土壤如砂质、粘土等也决定了依赖于水底土壤生活的动植物品种与分布。

火是生态因子。这是近几十年研究得出的一个结论，在某些地方它还是明显的限制因子。正如某些人所指出的：“无论是在时间和空间上，闪电引起的火灾都是我们生存环境总体的组成部分，它们与地球的气候节奏是协调的，我们的环境也可以说是火的环境”。一场大火可以把欣欣向荣的森林、草原连带其中各种动植物化为灰烬，破坏了所有植被。但是轻微的地面火却能帮助细菌分解植物体并使之转化为矿物质以供新植物生长需要，使杂草减少到最小量。一场轻微地表火后常使固氮豆科植物繁茂起来。火作为限制因子使用正在越来越被人认识，使用得好是益，使用不好则是个灾难。

压力、大气电离作用、电场等均对生物发生一定作用。例如大气压力变化使某些昆虫的活动性明显变化。夏天当大

雨将至，气压有明显波动时，蜻蜓低空成群盘飞即是一例。深海海底生物和海面上层生物对压力适应性差别甚大，位置的倒置可使一个“压扁”，一个“爆炸”。大气电离，正离子数增加，可增加昆虫活动性，已由爱德华兹(Edwards)1961年通过丽蝇例子得以证实。电场的方向短时间内经常变化（例如5分钟变动一次）可使果蝇飞行活动明显受抑，所有这些作为自然环境因子都有待于进一步研究。

（八）环境与生物间相互作用

地球上物质循环、能量循环是以非生物环境和生物间的物质，能量交换为其特征，这就说明这两者是相辅相成。环境可影响生物，生物也可影响环境，同时生物也是环境一部分。从这个意义上说，我们说环境对生物影响时应当包括生物相互影响部分。而生物间相互影响包括两部分：一部分是生物对环境的影响后再影响其它生物，可以说是间接影响；另部分是生物间直接影响，例如人类活动、捕食、竞争、寄生等。这里我们谈谈前者。

首先看生物对环境温度影响。我国有个俗语，大树底下好乘凉，说明树木对环境温度的影响。据测试，林区内早晨八时气温可比非林区对照点温度高 $0.2\sim0.7^{\circ}\text{C}$ ，而下午2时气温可低 4°C 。种禾本科植物的地里的温度变化和种植植物的特性、高度、密度等因素均有关。图4-11是收割前后苜蓿地与裸露地的垂直剖面温度变化情况，说明生物自身对生境小气候的温度有很大影响。这种温度变化反过来又影响生活于其中的动植物区系与分布。

湿度也是受生物影响较大的环境因子。在亚热带、温带

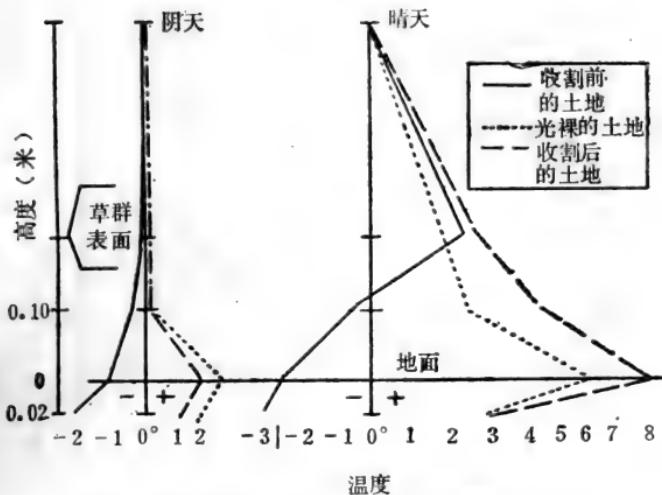


图4-11 收割前后苜蓿地和裸露地晴天与阴天
温度垂直变化情况(Boness)

原始森林中，我们常可看到树上和地上成片的青苔。而在同样气候的对照区中却无法见此景观，有的对照区甚至是赤地一片。由此可见年平均湿度相差之大。据观察，在密度较大的禾本科植被的下层，相对湿度常比对照区的湿度高10~20%。这就是在暖和季节中钻进一片禾本科植物丛里感到闷热原因之一。在这种植被下生活的物种就应充分适应这种湿度环境。图4-12表示灌溉后干菜豆植冠上部和内部相对湿度和水气压的日变化。

氧和二氧化碳在植物区系的小生境中变化是众所周知的。白天在这些区系的小生境中氧的含量最大，二氧化碳最小；夜里，大气中氧，二氧化碳含量比小生境中二氧化碳含量大些，而氧含量小些。

一般植被对光的截留量计算可由门司一佐伯给出的地面上光通量密度变化公式：

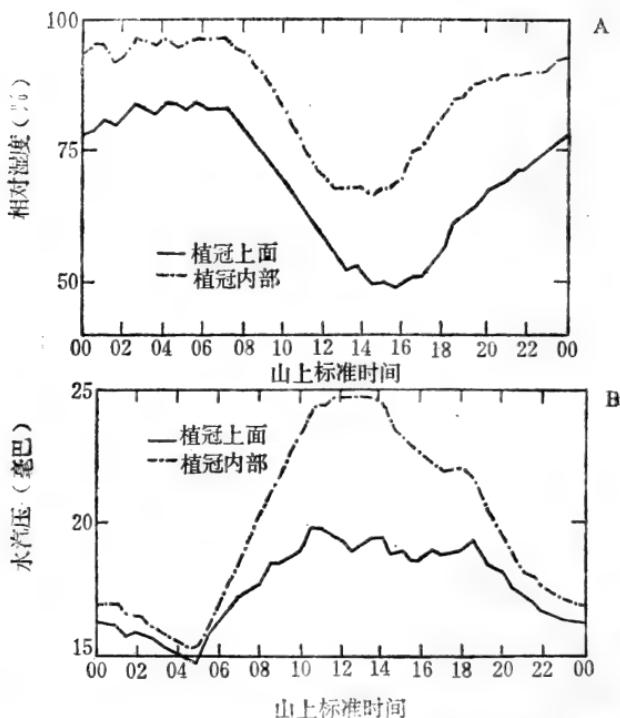


图4-12 灌溉后干菜豆植冠上面和内部相对湿度和水气压的日变化
A. 相对湿度日变化，B. 水气压日变化 (Rosenberg, 1963年)

$$I = I_0 e^{-KL}$$

I_0 为入射光通量, K 为常数, L 为叶面系数。 L 越大, 地面上光通量越少。由于这种遮荫作用, 使高植株下作物生长和植被下动物种类分布有所影响。所谓大树底下好乘凉一方面是因树下温度低, 另方面则是树叶遮荫作用。这对喜光植物生长则是不利的。图4-13表示实测到的玉米地不同高度处净辐射值。

森林, 草原对于减少水土流失, 增加降水等方面作用更为明显, 如法国的枫丹白露森林降水量比巴黎地区的年平均

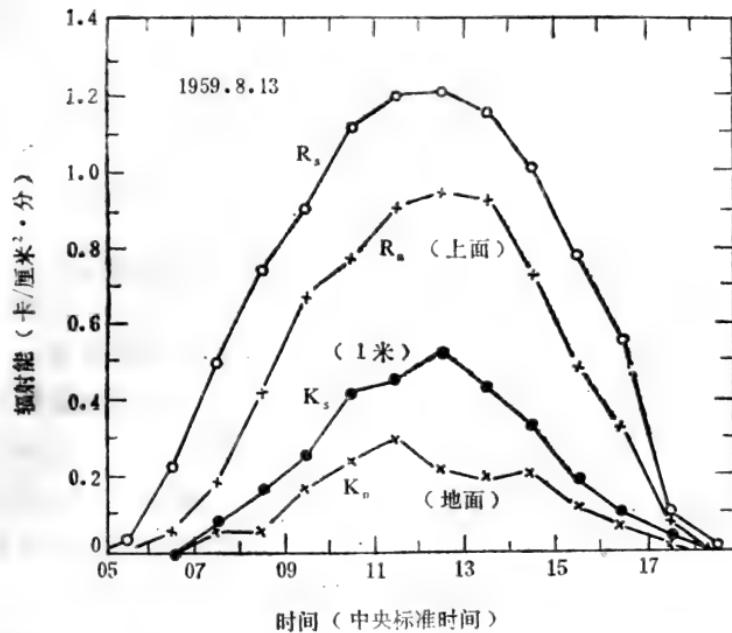


图4-13 玉米植冠上面的平均太阳辐射和内部不同高度的净辐射。
(Denmead等, 1962)

水量高17%。我国桐区水土报告指出,降雨强度在48毫米/时下测定,裸地土壤流失量为0.92吨/亩,而次生幼林林地为0.08吨/亩,林地比裸露地少近11倍。我国黄河流域水土流失严重,主要原因是抚育中华民族几千年的黄河流域被垦殖后几乎没有森林植被,从而对保持水土无所作为所致。

森林对于降低风速也是明显的,森林中湿度之所以大,风速较非林区小也是个原因。图4-14表示稠密防风林降低风速和防风面的影响。

下面是内蒙古昭盟地区赤峰县太平公社林带区与对照区一些比较数字

1. 林带区比无林空旷区风速降低70~75.4%,在四级



图4-14 稠密防护林对风速的影响和防护面积。(H为障碍物高度)
(Van Eimern等, 1964)

大风情况下, 林带背风区比空旷区风力降低二级左右。

2. 林网区树高3~5米范围内, 三月上旬土层解冻42厘米, 空旷区解冻23厘米, 提早化冻19厘米。

3. 林网区比空旷区相对湿度提高7%。

4. 林网区水面蒸发量1,642毫米, 比空旷区水面蒸发量2,302毫米减少660毫米。

5. 林网区比空旷区夏季降低温度0.1~0.7℃, 冬季提高温度0.5~1.6℃。

6. 林网区土层0~10厘米内, 土壤含水量比空旷区提高3.2~5.8%。

7. 林网区比空旷区早霜晚来15天左右, 终霜提前15天。

由上例可明显看到林地对环境小生境影响之大, 这种小生境的造成自然会引起一系列生物变化, 这就是当地农牧产量提高的一个因素。

林地、草地上植物对土壤影响也很大, 首先是各类植物叶、根腐烂后对土壤结构的改变。林下、草甸的腐殖土肥沃是众所周知的。而土壤中动物对土壤形成的影响也不可低估, 它对土壤的形成可以起加速和减缓作用。在土壤中生活的动物通过挖掘土壤改变了土壤结构, 改善了水气循环, 例如蚯蚓, 动物的挖掘, 运动还能使不同的土层和不同的腐殖物, 碎

屑等混合。这样就促进了土壤中物质被微生物分解并且也有利于微生物增长，地上植被和动物的运动、搜寻食物、居住均能影响土壤的形成。例如有蹄类在草地上践踏，使土壤结构受到影响，尤其是土层踏实可影响土壤内通风、通气、温度条件等改变。如果这时再加上过渡放牧就会使干旱时蒸发量加大，使土壤盐碱化，使土壤结构向坏处转变。啮齿类脊椎动物打洞掘地对土壤形成影响也颇大。例如旱獭、黄鼠打洞深达1~2米，有的旱獭打洞达6米。黄鼠在草原、沙漠中的洞常只是相距数米散布，如果下层是盐碱地，它们的挖掘运动可使碱土上翻而使盐碱化严重。所有这些均说明生物对土壤形成有很大影响。不毛之地和长期为林地、草地的土壤有天壤之别这也是人们所熟知的。

生物与环境相互影响是深广的。由于科学技术发展水平的限制，以前在讨论这类问题时多数还是局限于定性描述上。随着文明进步和人类对环境、生物的干预影响越来越大，人们对环境保护、生态平衡问题提出越来越高的要求，已经并不满足于定性描写环境与生物关系，而是要求定量地解答当某些环境因子发生一定幅度变化时，生物种群发生了如何变化。例如生物种群数量、分布区域、生长、发育、繁殖、遗传等发生了何种变化。这就要求给出某些环境因子和生物种群关系的模型，以之作为模拟、预测环境因子和生物关系，并可显示出因人类的某些越轨行为对环境及生物带来危害性。应指出，除了一些专一环境因子与特定生物种群间关系模式能较好给出外，对于若干环境因子对生物的综合作用模型多只是停留在理论研究阶段，与实际应用尚有一定距离。现在人们正努力缩短这个距离，探索与解决理论和现实生活中因环境中若干因子发生变化而导致某些生物种群发生

变化的模型，并以之定量预报某些生物数量、生长、发育、繁殖、行为、遗传等变化。

五 环境污染对生物的影响

(一) 若干化学元素、化合物的一些特性

现代人类通过各种工业活动，不但开采、提纯各种金属、非金属物质，使这类物质在生态系统中循环或非循环量猛增，而且还生产自然界没有的化合物，并使之进入生态系统。现在，人类已能生产7万多种化学产品投入市场。据估计，有机合成化学品1950年世界产量约700万吨，1970年为6300万吨，现在则达2~3亿吨。人工合成物质在环境中浓度，约从百年前零点开始增加到现在1ppb级。如果工业生产量每年保持以2~3%的量递增，那么因为环境中人工合成物质是工业生产量递增率的函数，所以可预料，百年后合成化学物质在全球环境中的平均浓度将达1ppm级。至于埋藏在地下的各类金属、非金属元素，更是不计其数地被投入生态系统中参预循环。因此，一些元素、化合物在环境中将成为许多生物的突出的限制因子。

自然界处于不断运动状态，而人类每时每刻都在影响着环境。无论是自然界还是人类活动产生的物质，在进入生态系统中，如果量值在达到一定后，并在一定时间内起了直接或间接地有害于生物的作用的，则称之为有毒物质；如果它是起直接或间接地有害于人类作用的，则称之为有害物质或污染物。有害于人类是指：1.危害人类健康。2.危及人类活动。3.使人体感觉不快。4.破坏或危害了人类所需生物资源或矿物资源。人们通常所说的污染物质指能使自然环境改变原有状态的物质，它常包括有有毒物质。

表5—1 若干典型有毒物质和

名称	主要化合物	正常情况下 状态	地壳火成岩 中元素丰度 (ppm)	对生物是 否必需	对人大致* 安全浓度 mg/m ³	饮用水 标准 (ppm)
铅 (Pb)	铅白、铅氯化物、四乙基铅、四甲基铅	固 态	16	非必需	0.2	0.1
汞 (Hg)	氯化汞、氯化汞、氟化汞、有机汞	固、液、气态	0.5	不需要	金属汞0.1 有机汞0.01	0.001
铜 (Cu)	硫酸铜、氧化铜、醋酸铜	固 态	70	必 需	铜粉尘*** 氧化铜0.1	0.1
铬 (Cr)	三价铬化物、五价铬化物	固 态	200	必 需	0.2	0.05
镉 (Cd)	氟化镉、氯化镉	固 态	0.15	非必需	0.1	0.01
砷 (As)	氟化砷、氧化砷、砷化氢	固 气 态	5	非必需	0.003	0.01
氟 (F)	氟化氢、氧化氟	气 态	~900	必 需	0.03~0.02	1.0
氰化物	含有氨基化合物如氟铬化物 氟化氢等	固 液 态	—**	非必需	—	0.01
酚类	苯酚、间苯二酚、甲酚、邻苯三酚等	固 液 态	—**	非必需	50	0.002
有机氯农药	DDT、666等	固 液 态	—**	不需要	—	—
有机磷	对硫磷、地虫磷	固 体	—**	不需要	—	不能 检出

* 这里大致安全标准，指大致对人健康无大危害。所列标准指不能超过表上所用灌溉水质标准TJ24-79(试行)》、《渔业水域水质标准 TJ35-79(试行)》所

** 地壳中没有铜粉尘为1ppm

污染物的某些特性*

灌溉用水 标 准 mg/l	渔业水域 水质标准 mg/l	从土壤中消失时 间(正常生态环 境条件下)	进入动物体方式	主要来源
0.1	0.1	10 ⁴ 年	以烟雾、蒸气、尘埃形式吸 入人体内,或由皮肤、消化道、 食物链进入体内	金属矿山, 颜 料, 蓄电池, 汽油
0.001	0.0005	—	汞蒸气、尘埃吸入皮肤, 食 物链进入生物体内	冶炼、制碱、 灯泡、化工、 农药
1.0	0.01	10 ³ 年	粉尘吸入, 消化道、食物链	矿山, 冶炼, 电镀, 化工
0.1	1.0	10 ⁵ 年	铬盐粉尘、烟雾从呼吸 道进入饮用水等从消化道进入 体内	电镀, 化工, 制 革
0.005	0.005	10 ² 年	粉尘、烟、溶液由呼吸道、 消化道、食物链进入体内	铅锌厂, 冶炼, 电镀, 化工
0.05	0.1	10 ² 年	粉尘、烟, 由呼吸道、消化道 进入体内	硫酸, 农药, 化肥
3.0	1.0	10 ⁴ 年	气体、液体由吸附, 饮用进 人体内	冶炼, 磷肥
0.5	0.02	—	尘埃、气体由呼吸道, 消化 道, 食物链进入体内	电镀, 焦化, 石油化工
1.0	0.005	1~15天	由呼吸道、消化道进入体内	燃油, 焦化, 化肥, 农药
—	—	95%需30年消失	由呼吸道、皮肤、食物链进 入体内	农药厂, 农业 喷洒
—	0.002	几天~3个月	由呼吸道、皮肤、消化道进入 体内	农药厂, 农业 喷洒

列浓度。所列标准根据国家建委、卫生部1976年5月《TJ20-76(试行)》、《农
业喷洒均是折合为元素值, 水中浓度不能超过所列值。

许多元素在生命活动中是有用的和必需的，但正如利比赫法则和耐性定律所指出，在生命活动中常常是缺了某物质不行，然而多了不但无益处而是会成灾的，特别是对生命活动所必需的微量元素更往往是如此。而不少元素虽然并非构成生物体必需的材料，却在生命活动中起不可缺少的催化剂作用。无论是生命活动中必需的元素或非必需元素，当在生物体内积累值超过一定阈限，或是低于必需品的阈值，或是进入生物体内途径方式是越轨行为，都将或多或少危及或影响生物的生命活动。例如磷是许多生物体构成中必需成分。但人、畜如吸入黄磷蒸汽可产生肝、肾的脂肪病变等疾患，严重的可导致死亡，所以一般磷作业场所最高容许浓度仅为0.1毫克/米³。不少重金属，当量值为ppb数量级时，它能对物质代谢起着催化剂作用，而当达到ppm数量级时，常可以观察到无益而有害的作用。象铜、铬、铁为人体、温血动物必需元素，缺铬可引起糖尿病、营养不良、动脉硬化等病症，多了却引起肺癌等病；铜少了可引起低蛋白血症，多了却产生肝硬化、心肌梗死、类风湿关节炎等疾患；铁少了易生龋齿等病痛、多了却可得血色素沉着症等。所以所谓有毒物质、污染物均是对不同元素、化合物量值、作用对象、作用时间及当时诸环境条件而定。当环境中存在有毒物质或污染物，使正常环境素质受到破坏或变得恶化，从而扰乱了生态系统和人类活动就叫做环境污染。显然，环境污染是一特定的生态因子，它是环境值的特定变量，现在越来越受到人们注意。

环境污染可以是人为的，也可以是因自然运动引起的，例如火山爆发、地震、风暴等自然运动。不过人们更多注意人为的污染，这种污染多数是人类活动导致生物环境中某些元素、化合物的变动。前已说明，各类化合物正在随着人类

各种需求而被加速生产出来。据估计，目前工业上使用的有毒化学物质大约有12000种，其中有1000多种有机杀虫剂，包括250种常用杀虫剂。每年平均有500种以上新的有毒化合物问世，这其中的大多数物质将对生态系统、人类社会产生什么影响尚无法明确估计出。只有一些影响面大、与人类关系比较密切的有毒物质和污染物才被人们做较为深入的剖析。我们把若干常见且影响范围较广的有毒物质、污染物的一些特性列于表5-1。对这个表须做如下说明：1.除少部分化学元素外，多数元素对生物的影响是以离子态形式出现。2.同一有毒物质、污染物对不同的动植物或同一生物的不同生长发育期其有害浓度阈值有很大差别，并也与它们作用时间长短、侵入生物体途径的不同有很大关系。3.在不同环境条件下，在有不同元素、化合物联合作用时，结果迥异。有的是联合加和作用，有的是协同作用，也有的是拮抗作用。4.生物因物理、生物环境差别，生物体本身生长状况等差别，其所受毒物的影响也相差甚多。所以表5-1所列大致安全浓度、危害浓度等均是作为在一定环境条件下正常的生物体受该物质单独作用时的参考值。

除了化学元素、化合物在一定条件下对生物有毒性是环境污染中重要方面外，还有诸如噪声污染、热污染、光污染、放射性污染、微生物污染等物理污染和生物污染，这些污染内容和对生物的影响将在后面做些必要介绍。

（二）有毒物质、污染物在生态 系统中循环与迁移

毒物、污染物进入生态系统中，有的作物物质循环，例如某些重金属、类金属等，有的合成物进入生态系统后受环境

中生化、物理作用后逐步分解而失去毒性、污染性，这中间有的则被生物所利用；有的是在生态循环中逐步被降解，其中降解速度较慢的如有机氯农药、聚氯联苯等，有的则是进入生态系统不久即被分解、转化，例如有机磷农药、酚、氰化物等。毒物、污染物在生态系统迁移与循环，它的运转途径如图5-1所示。

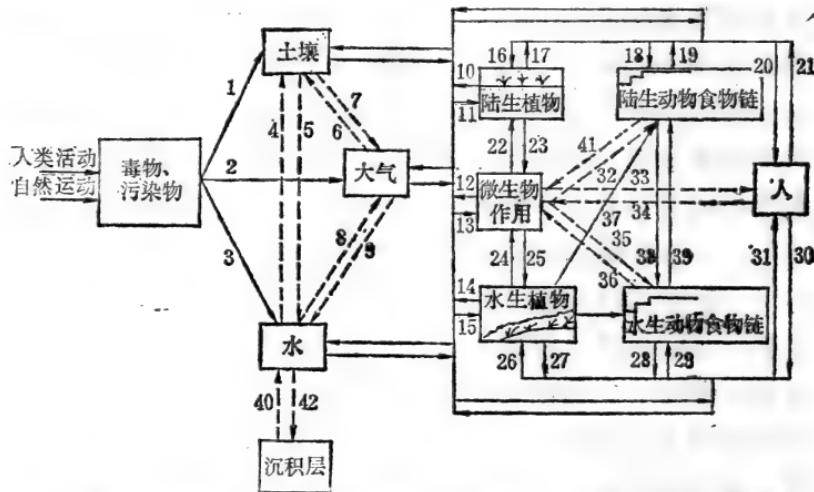


图5-1 毒物、污染物在生态系统中迁移、循环。1.废渣、风化。2.废气、挥发、蒸发、火山爆发、风暴等。3.废水、岩溶、灌溉、溶解、迁移。7,8挥发、蒸发、6,9沉降、冷凝。5.渗漏, 渗溶。4.灌溉。滴漏、排放。11,15,16,26.吸收、吸附。13.微生物吸附作用。18,19.吸收、食用、捕食。21,31,33.吸收、捕食、食用。22,25,32,35吸收。38,39捕食、食用。10,14,17,19,21,23,24,27,28,30,34,3641分解、尸解。40.风化、岩溶等。42.沉积成岩。

由图5-1可知这种循环与迁移大约有如下几个途径：

1. 毒物、污染物进入水体后被水生生物吸收或是经微生物作用后被水生生物吸收。吸收方式有食物链上各营养级直接吸收和沿食物链逐级传递富集；有的则经陆生生物、人食用后进一步富集。循着这一食物链系统受毒物、污染物作用的生物的尸体、肢体被微生物尸解后又返回水体进入再循环。

环，有的则沉淀在江河、湖泊、海洋的底泥中。

2. 毒物、污染物进入水体，由水体灌溉土壤或直接进入土壤，再由陆生生物吸收进入生物体或是由植物吸收后依食物链逐级传递到食物链中顶极动物和人。然后，被污染生物由微生物尸解又回到土壤、水、大气或沉积层中。

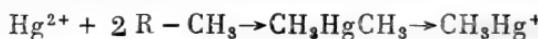
3. 烟尘、废气进入大气后被生物呼吸，吸附或沉降到土壤、水中再依1、2、途径循环。

较为稳定的毒物、污染物质，例如重金属等将如同我们前面所说的碳、氯物质那样在生态系统中循环、迁移；而有机氯农药、聚氯联苯等虽然也较为稳定，但在生态系统中循环、迁移时或多或少有所破坏和降解。许多毒物、污染物在进入生态系统后即因物理、化学、生化的作用后被降解、破坏变成无毒物质；有的则因被化合、络合而降低了毒性或加剧了毒性等。总之，从污染源出来的毒物，污染物一经进入生态系统就处于非生物环境与生物环境间的循环状态，或是被分解、化合、络合。这类污染源有的是人类活动的结果，诸如工业生产、农药的施放等；有的则是火山爆发、风化等自然运动结果。所有这类污染源产生的有毒物、污染物在环境中产生的生物，物理及化学变化简介如下：

1 生物性转化

(1) 生物体的积累、富集。相当一部分毒物、污染物进入环境后即被一些生物直接吸收而在生物体内积累起来。有的则通过不同营养级的传递、迁移使顶极生物的毒物、污染物富集达到可怕程度，可使人体发生严重的病变。如日本有名的“水俣病”即是食用富集了大量有机汞的鱼类引起，而“痛痛病”也是与镉富集有关的一种疾病。

(2) 生物性作用。有的物质进入环境后因生物的作用而发生物质性的变化。例如砷、汞等经过微生物作用进入动物体后甲基化成甲基砷、甲基汞等；汞在污泥中经过厌气微生物作用的甲基化可能方式之一是



不少的化合物如酚类、氯化物等可被菌类降解成水、二氧化碳、氨等。许多农药在微生物作用下起氧化还原反应。不少细菌可使许多有机化合物中芳香环破裂。生活污水中主要成分碳水化合物、脂肪、蛋白质的分解也多有细菌参预其中。

(3) 生物吸收、代谢、吸附作用。相当一类毒物、污染物都能被生物吸收。这些物质进入生物体内在各种酶系参预下发生氧化，还原、水解、络合等反应。有的毒物经过这些反应，转化、降解成无毒物质；有的毒性反而增强。如许多高等植物吸收苯酚后生成复杂的化合物（酚糖苷等）而使毒性消失，植物对氯化物也有类似机能；许多农药在生物体内均发生不同程度反应与转化。生物还吸附气体，如二氧化硫、氟化氢等，并吸滞尘埃。

2 化学变化

(1) 中和置换反应。毒物、污染物进入生态系，在水溶液中稀释、溶解后多呈离子态，所以很容易和环境中酸、碱性物质起中和置换反应。例如碱性废液排入酸性水体中得到中和，卤化物形态的铅转化为碳酸铅、硫酸铅等。

(2) 氧化还原作用。有的物质排入环境中发生氧化还原反应。如一氧化氮变成二氧化氮；一价汞离子和二价汞离子间可发生如下反应：



这样无机汞、有机汞就可以转化成金属汞。

(3) 光化学反应。许多化合物如农药、氮氧化物、碳氢化物在太阳光作用下发生一系列化学反应，产生异构化、水解、置换、分解、氧化等作用。例如，一氧化氮和碳氢化物在光作用下发生一系列化学反应产生了二氧化氮、臭氧、过氯乙酰基硝酸脂等有害的二次污染物，称为光化学烟雾，其形成过程如图 5-2 所示。而谷硫磷等杀虫剂在紫外光照射下即产生多种无杀虫能力的代谢物。

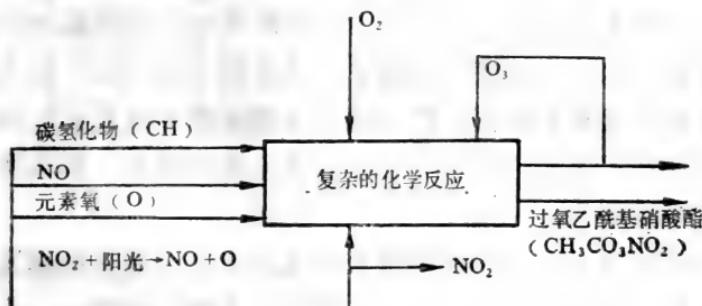


图5-2 光化学反应大致过程

3 物理变化

毒物或污染物质在环境中可以发生渗透、凝聚、蒸发、吸附、稀释、扩散、沉降及放射性蜕变等一个或若干个物理变化。

4 迁 移

毒物、污染物在生态系中各类转化过程常伴随着空间位置的迁移（上面所说的生物、化学、物理的转化过程中多少都有毒物、污染物的空间变动），从而使它们实现了在生态环境中转移、富集、分散、消失的过程。此外还有毒物、污染物在人、生物和机械作用下的位移，在各种气流、水流及其

它种种外力或内力作用下发生迁移运动。

上述机械、物理、化学、物化及生化过程与通常所发生的生态系统中物质循环相类似。只不过因各类毒物、污染物性质、种类、环境条件不同和作用过程不同又往往具有各自特性。下面就一些典型的有毒物质在生态系统中迁移循环过程作简单分析。

汞循环。汞循环较早被人注意，也是重金属在生态系统中循环的典型代表，它的循环如图5-1所示。

汞对生物是非必需的元素，汞的环境污染问题被注意起因于日本的“水俣病”和瑞典野鸭突然灭迹开始。首先发现甲基汞为鱼类所积累，然后经食物链被营养级较高的动物所富集起来。由此广泛研究汞在各类生境中转移、循环和对各类生物的危害。

地壳中汞经两条途径进入生态环境。一是火山爆发、岩石风化、岩熔等自然运动进入大气、土壤、水体。一是经人类活动如开采冶炼，工业、民用、农药等方面三废的排出和因使用汞及汞化物而进入生态环境中。据估计，前者每年约2.7万吨，而后者约为1万吨。这些汞的形态主要是元素汞、二价汞化物等。在水域中，这些汞在微生物作用下很快成为甲基汞、二甲基汞。甲基汞能溶于水并被鱼类所吸收积累，通过食物链传递给食鱼动物和人类，从而使较高营养级的动物和人遭受其害。二甲基汞挥发后进入大气分解成甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、汞(Hg)，其中元素汞又沉降到土壤、水域中形成循环。土壤中汞经淋溶作用可进入水体、水体中汞也可通过灌溉进入土壤。土壤中汞化合物可被植物吸收后进入食物链传递。金属汞进入动物体内可被甲基化，已经证明动物大肠内某些微生物也能使汞甲基化。汞进入生物体内，由

排泄系统或生物死后被分解返回非生物环境。非生物环境中汞有一部分进入沉积层，沉积层中一部分汞可分解出来进入生态循环，一部分就固化为地壳的一部分。大多数重金属及某些类金属元素与汞循环过程大同小异。

农药循环与迁移。农药，特别是有机氯农药循环与迁移越来越被人重视。有机氯农药循环途径如图5-3所示。

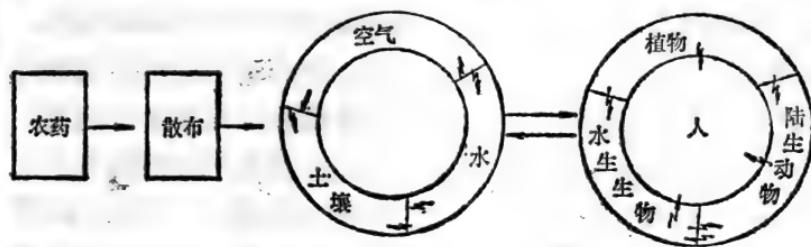


图5-3 有机氯农药迁移大致途径

有机氯农药通过挥发、溶解、沉降、渗透等途径进入大气、水、土中。这中间多数有机氯农药最终沉积到海洋，其中有的发生物理、化学、光化学反应等从而被分解、转化。生物只是从大气、水、土里吸收、呼吸进一部分有机氯农药。生物还直接将喷洒的或食物链中的有机氯农药吸收进体内。这些农药进入体内后有一部分为生物所蓄积，如有机氯农药因具有脂溶性而沉积在脂肪层中。一部分则在体内因受各种酶系作用被降解或发生氧化、还原、络合等反应，有的则通过排泄系统排出体外。进入水、土中的有机氯农药有一部分被微生物氧化、还原为衍生物，如 DDT 还原成 DDD、DDE 等，同样具有毒性。这些农药中没有被降解的又被生物所吸收、蓄积、富集而依食物链传递给高级营养层或进入人体内。这些生物排出物和其腐烂或尸解后，其中没有降解的农药或被转化了的具有残毒的农药又返回非生物环境参预生态循

环。我们看到，虽然有机氯农药较为稳定，但它究竟不象重金属元素那样可在自然生态环境中循环不已，它在循环中逐步被分解成无害之物使毒性消失或被转化成它物。这种多数物质在循环中被分解或转化，仅少数物质在有限次循环后而逐渐分解或转化成他物的过程称为不完全循环。许多化合物，例如聚氯联苯循环形成与有机氯农药极类似。由于这些化合物相对稳定性以及人类大量的使用促使它们通过气流、水流或其它机械、生物的携带搬运，使在不毛之地的南极与在格陵兰冰天雪地中生活的动物中也能检出这类有毒物质。

有的有机氯农药看起来药害不大，但它的分解物却大大有害。例如1969年日本使用的稻瘟醇（五氯苯甲醇）农药（防稻瘟病用）毒性较小，但用施用过稻瘟醇的稻草做堆肥时，微生物分解五氯苯甲醇为三氯苯甲酸、四氯苯甲酸，它可使瓜类、豆类等幼苗畸型并致死。

有机磷、有机氯等农药在施用后一段时间中绝大多数在光作用下发生物理、化学反应；或是在水体中被分解；或受热分解；或在酶系、氧化剂作用下发生氧化还原反应而被分解。因此这类农药在环境中不久即丧失毒性。对于这些农药，人们更注意它们造成的急性药害，这些药害在短时间内即可危及生命。这里应注意，这类农药中有的也象稻瘟醇那样，分解后毒性大大加强。许多化学物质与有机磷等农药性质相类似，它们在生态环境中残留期由几小时到几十天，或是更长些时间，它们在生态环境中谈不上循环，只是不同类型的迁移而已。

农药在环境中迁移、循环、积累、分解、残留等问题是很复杂的。一般来说在物理化学因素作用下，农药与土壤有机质结合形成残留物，在光作用下发生异构化、氧化、还

原、脱氯、络合、分解；在生物体内酶作用下形成络合物或发生氧化、还原、水解等反应；有的则通过食物链富集与浓缩，所有这些须视具体问题而定。人类合成的化合物相当大部分在环境中循环、迁移、积累、扩散等都与农药经历的过程相似。

有许多毒物、污染物是气态，如硫氧化物、氮氧化物、硫化氢及氟化氢等。硫氧化物、氮氧化物在生态系统中迁移、循环只是硫、氮在生态系中循环的特例。不少氮、硫化物在环境中稳定性较差、较易分解、化合。在环境中它们的污染性、毒性可发生较大变化。例如气态的硫化氢(H_2S)只需几小时即被 O_3 、 O_2 、 O 氧化成二氧化硫(SO_2)，几小时后或数日内， SO_2 又与 O_2 、 O_3 、 NH_3 或碳氢化合物发生反应成为硫酸或硫酸盐。它们的危害性须视生成什么硫酸盐。有关氮氧化物等循环可参看前面的氮循环论述。

(三) 毒物在生物体内转归和作用

有毒物质进入生物体内对生物体的影响除了与毒物量值大小密切相关外，还与毒物在体内代谢过程密切相关。但各生物体对不同毒物代谢过程差异很大，即毒物被生物体吸收后，在体内迁移、循环、分布、转化等因生物种类和毒物类型、状态不同而千差万别。做为物质在生物体内吸收、迁移、循环排泄等代谢过程又有许多共同之处。所以这里所述毒物在体内代谢过程可做为其他物质、污染物在体内代谢过程的参考。

1 毒物在动物体内转归

毒物种类繁多，许多种类究竟能对生物起什么作用，我们

至今并不清楚。人们只是对生物必需的、且已知的物质和明显有害于生物的物质在体内代谢过程做较多研究。图5-4是一般毒物进入动物体方式与它们在体内循环，迁移的动态过程。

毒物经体膜进入体液、血液的过程称为吸收。首先环境中毒物经呼吸道、消化系统、体表，皮肤、食物链为动物所吸收。毒物在整个呼吸道都可以被吸收。许多动物都有肺，肺泡上皮细胞层薄并且表面积大（约为皮肤表面积的40倍）、血管丰富，使许多气态、气溶胶状态又具有脂溶性的毒物通过简单扩散为肺部所吸收。如一氧化碳、二氯化硫、硫酸雾等。鱼类通过鳃把溶解于水中的毒物呼吸进体内进行转运。由呼吸道吸收的毒物沉积在上呼吸道部分，有一些可进入肠胃被吸收。弱酸类毒物在动物胃里脂溶性较强，易被胃吸收。弱碱类毒物多在小肠被吸收。在肠胃中还有特殊的转运系统吸收营养物、电解质。有些有毒物质可能被相同的转运系统所吸收。此外，消化系统中各种酶、菌也可影响毒物的吸收。对于脂溶性较强的毒物，还广泛地通过体表、皮肤吸收进体内。对许多低等动物，经体表吸收毒物是个很重要的途径。皮肤吸收方式主要是经毛囊、表皮吸进。因不同生物皮肤通透性差别及毒物的种类不同，使通过皮肤吸收的毒物量值相差很大。经上述路径进入体内的毒物有的没有经血液、体液转送到体内各部位即被排出，例如沉积在支气管上皮的毒物；有的通过咳出被排出体外，通过消化道进入体内毒物有的没有被肠胃吸收即被排出体外。同样经体表、皮肤进入体内毒物又经汗腺被排泄出体外，这些没有进入体内循环，迁移的毒物一般来说对生物体影响不大。对生物体影响较大的是那些被吸收毒物通过体液或血液循环系统把毒物输送到体内各部位。

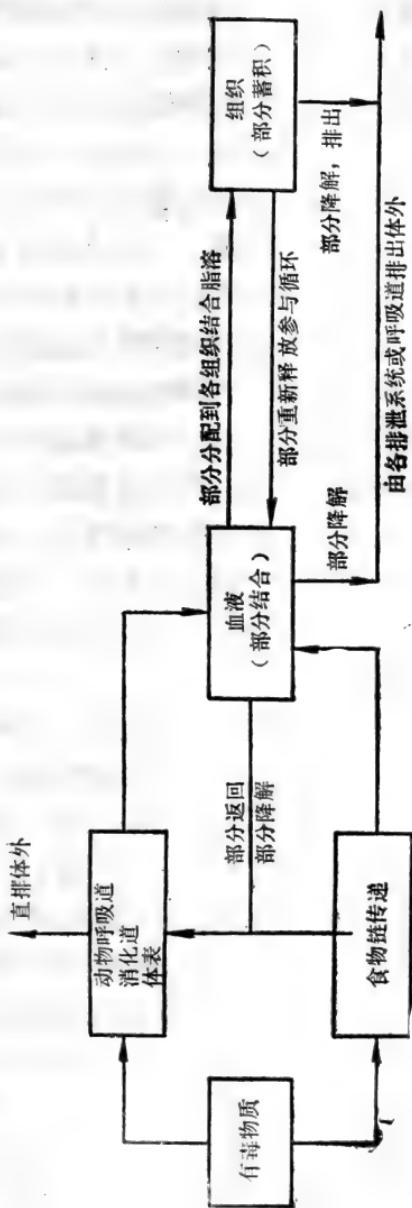


图5-4 有毒物质在动物体中循环迁移概况

有毒物质经上述各途径进入体内后很快就通过血液、淋巴系统、体液等输送到动物各组织中去，这一点现已研究清楚。但许多有毒物质在血液中以何种形式结合、输送还不十分清楚。据说用镉做实验得出镉是结合血清中 α_2 -巨球蛋白状态被运输，而一些有毒化合物进入血液后即和血液中蛋白结合。例如二氧化硫、一氧化氮、一氧化碳等都以与血红蛋白结合后进行运输。而有的有机氯化合物进入血液后在某些酶系作用下发生缓慢的脱氯反应并随血液带走。一般来说进入动物血液的毒物大部分与血浆蛋白做不同程度结合而被运输，少数成游离态。现已查明，不同毒物与血浆蛋白结合有竞争性，这就是说与血浆蛋白结合性能弱的毒物可被结合性能强的毒物所取代。并且也能取代那些与血浆蛋白结合后运输的但结合力较弱的生理代谢物，如激素、胆红素等。应指出任一物质与血浆蛋白结合均是可逆的，且与血浆中游离态的该物质形成动态平衡。

淋巴、血液或体液中毒物通过细胞膜进入机体各组织中的方式一般有如下两种。1) 细胞膜对毒物的通过、转运起了主动作用。如帮助(易化)扩散、主动转运、吞饮、吞噬等，称为特殊转运；一些非脂溶性大分子、离子、极性物质常为某些细胞泡所转运，并且因某些细胞膜特殊机能能使毒物或其它物质从低浓度一侧向高浓度一侧转运，即主动转运。有些毒物因具有与细胞膜中某些蛋白质间特殊亲和力，当毒物与细胞膜接触时使膜外包或内凹把毒物“吃”进细胞称为吞噬(对固态毒物)或吞饮(对液态毒物)。特殊转运特点是细胞膜具有主动选择性、具有特定结构的毒物和细胞膜特定蛋白质结合成载体形成可逆性复合物进行转运。2) 相当广泛一类毒物主要是利用细胞膜内外侧毒物浓度梯度由高

浓度流向低浓度进入细胞。这类流向速度除浓度原因外还须视细胞膜的通透性、毒物的脂溶性和大小。另外利用细胞膜两侧液体渗透压差或液体静压差使水携带毒物分子进入细胞内。前者称为简单扩散，后者称为过滤作用，两者统称被动转运型。这一类型细胞膜不起主要作用，不消耗细胞代谢能。毒物究竟以何种形式由血液进入各组织细胞中，须视它们自己理化特性和结构以及各组织的细胞膜特性。多数毒物属被动转运；有一部分与生物必需的营养物、代谢物相类似特性的毒物则多属特殊转运范畴。

毒物进入不同组织的细胞后，在各种酶作用下与细胞中各物质发生氧化、还原、水解、结合等作用，这一过程中不少毒物通过脂溶和生物转化后在体内各部位蓄积起来。由于各组织细胞通透性、亲和力和代谢物的不同，使生物体内毒物的分布和蓄积有很大差别。大体上可分为：1) 脂溶性强或与脂肪亲和力大的有机氯、有机汞农药多分布在动物体脂中。2) 对某一组织具有特殊亲和力，如二价铅、钙、锶等多蓄积于骨骼中。一氧化碳主要存在于红细胞中，汞、铀积累于肾脏。3) 因肝脏通透性高，多数有毒物易于进入肝脏，肝脏中对毒物亲和力特强的蛋白往往取代了血液中与毒物结合的蛋白而把毒物摄进肝脏，如镉等多蓄于肝中。4) 能溶解于体液的毒物则在体内均匀分布，如氟、铯等离子。毒物在动物体内分布并非绝对在某一部位，而是多少而言。有的组织积累得多，有的相对较少。通常情况下，肝脏结合毒物的速度较快，如铅中毒30分钟后，肝脏中的铅浓度可为血液中的50倍。某些组织有特殊屏障阻碍毒物进去，如血脑屏障可阻止水溶性强或极性强的毒物进去，对胎生动物的幼仔这部分较弱，多数毒物也可越过胎盘屏障由母体进入胎体

内。已在脂肪或骨骼中的毒物，一般说对生物毒性作用较小，但有时也可重新释放出来参加体内循环。如动物饥饿时消耗脂肪的分解代谢过程中把蓄积于其中的毒物游离出来参预循环，这是毒物在体内循环的一部分。

毒物进入动物体内部，除没有进入血液、体液循环，且很快被排出体外外，进入循环、转运系统或进入体内各组织中的毒物或多或少都将发生氧化、还原、水解、络合反应，称为生物转化。生物转化过程与体内各种酶、诸环境、生理因子有关，当毒物进入血液中即发生。这个转化有两个过程。首先是毒物在混合功能氧化酶作用下发生氧化反应，如脂肪烃羟化等；有的在各种还原酶作用下起还原反应，如还原脱卤作用等；有的在水解酶作用下起水解反应，如对酰胺类等。其次，毒物经上述反应后形成新的代谢物，原有化学结构有所改变，这样就与体内各组织细胞中特定物结合形成新的结合物。多数毒物经上述生物转化过程后极性、水溶性增加，使之易于排出体外；有的是使它们毒性降低或消失；但也有少数毒物经转化后毒性反而增强或基本不变，不少重金属即是如此。有的新的代谢物蓄积于体内特定组织中，有的代谢物则易起可逆反应，使毒物重新进入输送系统参预循环。某些毒物对肝、肠即构成这类循环。容易看出，虽然每次循环周而复始。但由于生物转化作用，每次参预循环的毒性量都在衰减，如果生物体脱离了污染源或毒源，则某些毒物在体内的存在随着时间流逝而消失，毒物在体内时间随种类的不同有很大差别，有的可能是几小时，有的是以年、月计。这是因生物转化的代谢物稳定性不同而引起。例如：重金属汞、镉、钼、银等在离子态时与动物体内高分子结合成金属硫蛋白（硫基与金属结合）就相当稳定。不同金

属、类金属稳定常数相差很大，半衰期由几小时到一、二百天。正是这种差别，使生物体特定部位能较久蓄积某些毒物。对于氯氧化物、硫氧化物，有的作为硫、氯参预动物体内转归，有的则与其它化合物结成盐类。各类毒物，无论是以离子态或元素态被吸进动物体后，多多少少都将以这种方式或那种方式被排出体外。

动物的排出物如尿、粪、汗、乳汁、呼气等均可排出进入体内的有害物。但最主要的是经尿、胆汁排出毒物，从血液扩散到肾小管的毒物或被降解的毒物通过排泄或主动分泌把毒物排出，也有个别不易排出者又重返血液参预循环。由肝脏转化了的毒物可进入胆汁与小肠，也有的毒物可直接扩散到胆汁。胆汁排泄物进入肠系或粪便排出，也有个别又回到血液系统循环。许多挥发性较强的毒物可从呼吸道排出，有的则从毛孔、乳汁等处排泄。

2 毒物对动物的作用

毒物对动物体危害机制差别甚大，例如铅主要是对机体卟啉-血红素代谢系统施加影响；铬则是以六价铬渗入细胞后还原成三价铬，再与细胞中大分子结合使遗传密码发生变化，而导致细胞突变与癌变。重金属离子对水生生物中毒机理则主要是因为金属与粘液中有机分子结合生成的络合物附着在水生动物体壁，阻碍了氧和二氧化碳交换，以及由摄食进入消化道引起的急慢性中毒。而一氧化碳与血红蛋白亲和力较氧与血红蛋白亲和力大200~300倍，它使血红蛋白失掉输氧能力。二氧化氮则能使肺脂质过氧化而导致肺损伤、肺气肿等。至于杀虫剂对动物作用差别更大，有的杀虫剂可致害虫于死地，却无损于益虫。总之，毒物对生物的作用因环

境条件，生物种类、生长发育情况、性别和年龄等差别而不同，只能“就事论事”。

3 有毒物质在植物体内转归

有毒物质在植物体内转归如图5-5所示。

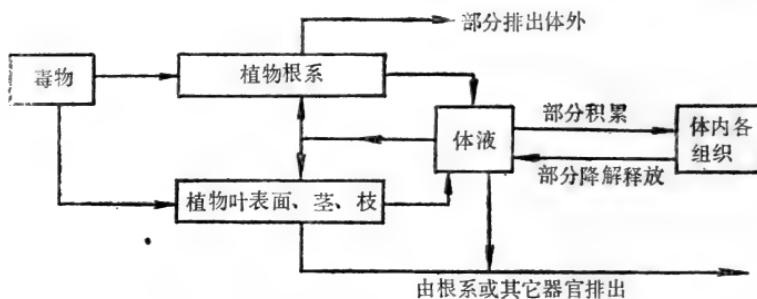


图5-5 毒物在植物体内转归、循环示意图

毒物在环境中处于离子态或是吸附在土壤表面，可被置换的离子均可以被植物根系所吸收。这类吸收有主动吸收和被动吸收。前者指靠细胞的代谢能吸收，而被动吸收则是利用根内外离子浓度差别、电化学梯度差使毒物向根内扩散。叶表面的吸收则是毒物通过表皮细胞渗入与吸附，是毒物进入植物体内的重要渠道。同动物相类似，毒物被植物吸收后，有的没有进入植物细胞即通过气孔、根系被排出体外。

有毒物质进入体内后主要靠细胞间连丝等作用实现了毒物在细胞间和体内的物质迁移。毒物进入根、叶、茎后，一部分毒物就停留、积累在根、叶、茎处。另一部分则是通过木质部导管随溶液流向植物各部位。例如从根部吸收进的毒物随着蒸腾作用而上升，在导管某一高度处做径向运输达到应去的地方。从叶面吸收的毒物则由气孔吸进经细胞间隙传

送到导管并向下输送，所有这些物质迁移过程均有溶液的参预，在疏导管系统中流向植物体各部分。虽然有毒物质在植物体内多是靠蒸腾等作用随水分一起运输。但也有并非靠它起运输作用，例如有的沉水植物蒸腾几乎不存在，照样可把毒物运输到植物各部分。

毒物进入植物体各组织与运输过程中也发生生物转化。这种生物转化方式与毒物在动物体内发生的生物转化相类似，也是氧化、还原、水解与络合等反应。在这一反应过程中有的毒物被水解，毒性减弱或消失；有的则通过一系列降解后为植物所利用；有的经生物转化后毒性反应加强。多数离子态毒物在与植物体内有机分子结合后对植物起某种损害作用。例如某些离子态毒物能置换出酶蛋白中的铁、锰元素而结成较为稳定的结构，使酶活动受到抑制，从而阻碍了代谢活动；有的金属离子则是取代了植物体内蛋白质中的-SH基中的氢，使正常的代谢和氧化—还原过程受到干扰破坏，并由于吸收了毒物而阻碍了养分的吸收。

毒物在植物体内的生物转化，有的毒物并不稳定，它们被不断地分解、析出并转移到其它组织中形成循环，这一循环往往也是阻尼循环，最终导致毒物的毒性消失。有的毒物可循环一次，有的则是多次，有的则生成难溶且稳定的化合物，不再参预循环。植物不象动物那样有特定排泄系统，活的植物对于金属、类金属的排出往往通过根系排出，有的是通过叶面呼吸带走或是其他方式排出（包括枯枝落叶）。因植物没有专门排泄器官，所以有害物质排出较动物少，毒性更易于在各组织积累。但在不同环境条件下，不同物种和不同组织中这种积累、分布差别很大。一般来说，毒物由土壤、水域经根部进入植物体积累量大小顺序为根、茎、叶、

穗、壳、种。但对大气中经叶部进入植物体毒物，则往往叶、茎部毒物积累量大，例如稻草含铬量占地上部分铬含量的90%左右，谷壳占5%，糙米占3%。而气态氟化物多积累在叶片上。

4 毒物对植物的作用

植物的能动性比动物差得多，当环境物质浓度，尤其是土壤与水域中物质浓度达到一定值后，这些物质都将涌进植物体内，它们有的是植物所必需的，但量多则成灾；有的则是明显有害；有的在某个量值时对植物无害，但在食物链传递上却对高营养级生物产生害处……。这些均须视植物和物质种类、量值大小等而定。例如铜是植物必需物质，但铜多了妨碍植物根部生长，出现黄化现象。酚、氰类化合物浓度较低时被植物吸收并转化成糖苷，此时，不会出现氰类对细胞的毒害，而且经诱导后为植物细胞所利用，参加正常代谢过程。但在高浓度下却能致植物于死地。某些重金属、有机氯农药等在浓度较低时并没有对植株造成损害，但它们在植株中的累积物却对食用它的动物造成危害。而当一些重金属，类金属达到一定浓度后和比较高浓度的氟化氢、臭氧气体却可以立即对植物造成伤害。毒物对植物损害机理是多种多样的，有的是干扰酶作用进而阻碍代谢机能，如氟化物类气体和重金属；而有的毒物却能引起植物变异，如在严重的金属污染区内常发现这种变异种；有的则因与根系有机分子形成较为稳定的络合物，破坏根系正常代谢机能，进而引起生育障碍等，如过量的铜污染；有的是强氧化剂或强还原剂，影响植物氧化还原反应，如臭氧、氯气，二氧化硫等。

我们谈了毒物在生物体中转归与作用的一些情况，它与

某些同毒物结构、机制相同的物质在机体内转归、循环有大致相同过程。事实上，有的有毒物质本来就是生物的正常必需物，只是量值太大使之成为毒物。因此在某一意义上这里是介绍了物质在生物体中转归情况。当然也有不少毒物纯是多余之物或是有害无益之物。

（四）有毒物质在生物体内转归 和作用的实例

本节举例说明毒物在生物体内转归、作用。这些例子比较典型，也是人们研究得比较多的。应该说明，大多数毒物对生物作用、在体内循环、转归还不清楚，甚至还是一笔糊涂帐，是人类应着力开发之地。这包括莫名其妙致人、畜、作物于死地的病害。

例一 汞 (Hg)

1. 汞在动物体内转归、作用。

汞非动物必需物。汞可经消化道、呼吸系统、体表直接进入生物体或是从食物链传递到食用者体内。元素汞，一价、二价离子型无机汞化合物在动物肠道内吸收率在10%以下，而对于有机汞，例如具有甲基、乙基的低烷基汞，由鼠、猫、猴等实验动物测得投与量90~95%均可被吸收。有关无机离子型汞及低级烷基汞经呼吸系统吸收的详细定量资料报告虽未见，但从一些实验及人为事故中毒实例中，一般认为某些烷基汞经呼吸系统被肺等器官的吸收率达80%，在动物实验中，甚至观察到肺泡吸收率为50~100%。由于汞富于脂溶性，故可经体表吸收。把金属汞涂抹于狗的皮肤上，其内脏器官汞含量即可上升。对于食物链顶端的许多动物，

包括人在内，从食物链上吸收汞量相当大。汞从上述三种渠道进入身体后再进入血液，离子汞与红细胞或血浆中的蛋白质结合后向身体中各组织转移，无机汞则大部分分布于血浆中。随着元素汞、离子汞进入动物体方式的不同，在动物体中分布差别很大。元素汞从血液转移到各组织中，最主要蓄积于动物的肾中，其次是肝脾中，脑中则较少。甲基、乙基汞较容易通过血管壁向细胞里迁移，所以各脏器中汞的蓄积量相差不大。由于离子汞还能穿过血脑屏障进入脑组织，从而也可在脑、神经系统积累。元素汞主要从动物肾脏中排出，或直接从肠粘膜排到肠道中，或经由胆汁排到肠道中。有的由汗腺、唾液腺甚至呼吸系统中排出。对于甲基、乙基等低级烷基汞排出渠道主要是从粪便排出。甲基汞从胆汁向肠道排泄中有一部分被肠道吸收，估计约50%被吸收参预下一循环，故甲基汞排出较乙基汞慢得多。但有机汞在体内也可分解成元素汞再排出。这样从粪便中排泄出的甲基汞多已受到脱甲基化。应指出，元素汞的化学反应不活泼，它们在动物的血液或其它组织中被氧化成为离子型汞后再与体内蛋白质相结合。关于甲基汞在动物体内的半衰期，各研究者估计数差别较大，一般认为在人体内为40~120天。汞及其化合物危害生物机理主要是汞离子与生物体内的巯基有很强结合力。它与蛋白质和物质代谢中起重要作用的羟基相结合，形成相当稳定的金属硫蛋白，这个稳定性可由表5-2看出。甲基汞还可破坏细胞中离子平衡，抑制营养物进入细胞，而且还能引起有益于细胞结构的离子渗出细胞，使细胞坏死。甲基汞常粘在动物脑和神经细胞膜上，使细胞的核糖核酸减少，并导致细胞分裂成碎片和死亡。早已知道，汞能引起事故和急性中毒事故，但它做为环境污染的重要议题是由1953年日

表5-2 甲基汞与汞离子结合物的稳定常数

配位体	CH_3Hg^+	Hg^{2+}
OH	9.5	10.3
组氨酸(NH_2)	8.8	10
半胱氨酸	15.7	14
白蛋白	22.0	13

本熊本县水俣湾周围地区发现的水俣病引起，联系到瑞典鱼类、禽类尸体中检出的汞及汞化物而产生的。这些人、禽的汞中毒主要是从食物链吸收了汞化物。水俣病症状是：精神错乱、手指振颤、痉挛、惊厥、周身象弓弯曲，导致手足残废或是视野缩小、听觉失灵，图5-6是汞中毒化验员振颤手迹。



图5-6 化验员汞中毒后手指颤抖的手迹

2. 汞在植物体内转归和作用

汞非植物必需物。植物根系可以从土壤中吸收甲基汞或金属汞，也可由叶片上吸收进喷洒的含汞农药或雨水、尘埃中含汞物质或汞蒸气。植物由这两途径吸收进的汞和汞化物可经植物导管和韧皮部转运到植物体各部分。它们主要是靠

溶于水溶液和由植物体液带走。浮游植物则从其表皮吸收汞输送到身体各部分。进入植物体的元素汞和汞化物一部分被植物所积累；另有一部分经根、叶部排出体外。汞对植物危害的机理是汞离子取代植株中蛋白质的-SH基中的氢。进入体内的汞和汞化物能抑制植物的光合作用和生长速度，并可致死，汞蒸气浓度即使少于10微克/米³也能损害植株。有机汞和无机汞化物同元素汞引起的汞中毒症状很相似，不易区别。从土壤和水溶液中吸收的汞在植物中积累大小顺序一般为根、茎、叶、果。从叶子吸收的汞，叶上积累居多，且叶子很快出现受害症状，从出现斑点到变黑、枯萎至落叶。汞在生物体内循环乃是一些重金属在生物体内循环的典型代表。后者在生物体内循环，迁移、转归与前者大同小异，当然这种“小异”有时相当大。

例二 二氧化硫 (SO₂)

1. 二氧化硫在动物体内迁移、转归和作用。

硫和氧是动物生存活动所必需的，它们的化合物二氧化硫多呈气态，经由口、呼吸器官进入体内。由食物链进入动物体的亚硫酸盐经消化系统吸收后部分氧化成硫酸盐。被动物体吸收的二氧化硫很快经血液输送到各组织中去。进入各组织中的亚硫酸盐离子和生物有关的物质如醛、酮类、氨基酸、脱氨酸、核酸等进行可逆反应，并逐步从机体的排泄系统中排出。对于亚硫酸气体和亚硫酸盐对机体的作用，有人认为在低浓度时是安全的。有的则认为其毒性试验还不充分。但较高浓度的二氧化硫却能引起身体的许多疾病。致病的主要原因是由于二氧化硫易溶，这样从呼吸器官吸进的二氧化硫被器官上富含水的物质吸收转化成亚硫酸，部分又氧化成硫酸，从而刺激呼吸器官和肺部。受二氧化硫刺激后，

呼吸器官内平滑肌把信息传给脑中枢神经，使平滑肌反射收缩。这类刺激在低浓度作用时对动物不明显，浓度在5~10 ppm时就可以引起慢性支气管炎等疾病，严重的会导致肺气肿、肺硬化、肺组织病变和支气管哮喘，并致人或动物的死亡。因二氧化硫等有毒气体联合作用而导致死亡的报导，最早是1930年12月1~5日的比利时缪斯河谷事件。当时因含二氧化硫等空气污染，患呼吸道刺激、胸痛、呼吸困难等疾病的死亡者超过60人，主要凶手是硫的氧化物。这些事件中最有名的是伦敦烟雾事件（1952年12月5日~9日），死亡人数超过3500人。死者中约有80%患过肺病和心脏病，死因是呼吸器官受强烈刺激，当时测得空气中二氧化硫浓度为3.7毫克/米³。烟尘浓度为4.5毫克/米³。在伦敦烟雾事件中，死亡的短角菜牛是因患肺气肿、支气管炎等疾病而致死的。高浓度二氧化硫可导致许多动物患病和死亡。

2. 二氧化硫在植物体内迁移、转归和作用。

二氧化硫可通过叶表面气孔进入植物组织，植物也可从根部吸进硫化物。进入体内的二氧化硫，大部分经多种生物转化后成为硫酸盐，积累在各组织中，有少数的变为游离氨基酸、蛋白质等，其详细转化机理至今尚不清楚。进入体内的二氧化硫有相当一部分是经海绵组织扩散到栅栏组织后溶解于细胞，因而引起细胞物质破坏和变形，可导致细胞壁分开，破坏叶绿素，使叶绿素失去镁并抑制植物叶中过氧化物酶等辅酶的活性。有人认为，二氧化硫进入体内与植物中的代谢物 α -醛化合物生成 α -羟基磺酸盐而引起了破坏细胞结构的作用。进入体内的二氧化硫可由叶孔挥发，有的随枯枝败叶脱离枝体而完成二氧化硫在体内的循环迁移。据报道，植物受到二氧化硫侵害后，生理上发生了很大变化。在不同二氧

化硫浓度中，可使细胞中水分减少，非还原糖减少，叶绿素A减少，蒸腾、呼吸作用增大，总氨基酸含量减少等。图5-7是受二氧化硫侵害后的植物状况。顺便指出，危害人类甚大的酸雨其主要成分是二氧化硫，因此酸雨对生物体危害机理有许多地方同二氧化硫。

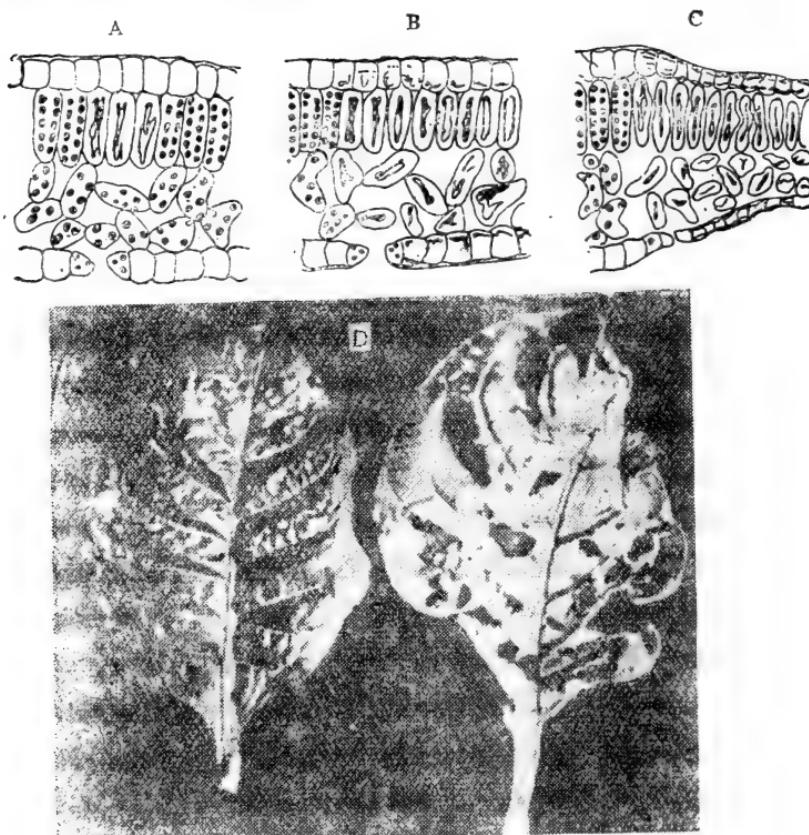


图5-7 二氧化硫对叶片危害过程

A. 二氧化硫侵入叶片的栅栏组织，外表看不到受害症状。B. 栅栏和表皮组织均受害，叶子表面有伤斑。C. 受害严重，细胞脱水收缩、叶表面伤斑下陷、干枯(科学院植物所)。D. 烟草营养生长期熏气，左： SO_2 含量为 0.9ppm ，熏气6小时，当天摄脉间凹斑。右： SO_2 含量为 1.7ppm ，熏气6小时，熏气后一周，伤口已干枯脱落，呈穿孔状(上海植生所)。

例三 滴滴涕 (DDT)

1. DDT在动物体内转归和作用

DDT通过呼吸道、体表、食物链进入动物体内，再经血液输送到各组织中。在血液中，DDT与基质中活性氧原子起作用而产生脱氯化氢反应，这个反应很慢，只有部分DDT代谢为DDE；有的则起脱氯反应转化为DDD；部分DDD和DDE又再降解为DDA，但因DDT的苯环较为稳定，所以相当一部分没有发生转化。不管转化了的DDT还是没有转的DDT，有一部分随着血液输送到各组织，脂溶于脂肪层中，如大量蓄积于动物体脂肪和肝、肾等脏器，当饥饿或运动耗费脂肪时，又把DDT等释放出来参预循环。DDT等还可蓄积于子代蛋黄中，另一部分则通过乳汁或胆道排入肠中，从粪便排出体外或通过其它排泄器官，如呼吸、汗腺等排出体外。DDT在鱼类中循环、迁移如下所示：

水 → 鳃 → 血液 → 细胞膜 → 脂肪类物质。

对于高等动物，除了个别主观行动（如自杀等）外，高等动物体内的DDT相当大部分是来自食物链积累的。DDT对生物的危害机制：1.蓄积于脏器中的DDT，可破坏脏器细胞结构并使之发生病变，甚至死亡。2.DDT能使中枢神经应激性增加，具有神经毒害。3.能抑制三磷酸腺苷酶，能诱导肝内酶，从而对机体代谢产生影响。它还是肝脏内羟基化反应酶的诱发剂，这种酶可使甾体代谢发生变化，从而使生育率下降。4.它对子代遗传产生影响，使胚胎发育、子代发育产生障碍。DDT干扰了钙代谢过程，使鸟类蛋壳变薄。图5-8是DDT降解产物DDE与蛋壳厚度关系，一般情况下，蛋壳厚度减少20%就要破裂。

早就发现DDT导致许多鱼、禽类死亡。DDT因食物链富

集导致鸟类较大规模的死亡乃是1960年5月22日至6月2日在美国加利福尼亚东北部明湖和下克拉马斯保护区，发生食鱼性鸟类死亡307只，分析表明是因DDT浓缩致死。DDT在土壤中自然消失95%的时间约为4-30年。

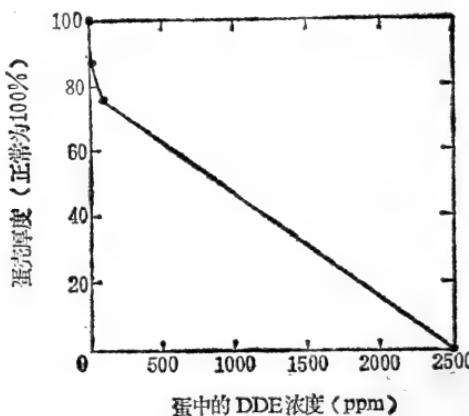


图5-8 DDE在蛋中含量与蛋壳厚度关系(peakau, 1970)

2. DDT在植物体内转归和作用

植物主要由根系吸收DDT，也有部分由于喷洒药物等原因从叶片上吸进，它随水溶液输进导管再输送到植株各部分。DDT在植物体内转化过程为 $\text{DDT} \rightarrow \text{DDE} \rightarrow \text{DDA}$ ，这种过程是在蛋白酶参与下完成的。DDT与它的代谢物极少量可由根系排出，它们多数是蓄积、溶于植物组织中。它在各部分蓄积的大小分布基本上是根>茎>叶>果。DDT在土壤中好气细菌作用下转化为DDE、DDD，因DDE易溶于水，所以更易进入植物体内。有报告说，在水域中含有低浓度DDT时，即能使浮游植物光合作用降低，也有报告说，它能影响叶绿素的形成，DDT对某些敏感藻类可产生较大影响。

(五) 生物的富集(浓缩)

毒物经各种渠道进入生物体后，有的被转化，有的被蓄积，有的则被排出，对于不同毒物、不同生物物种和不同的环境条件下上述几个过程差别很大。当环境条件不变时，源源不断的毒物进入生物体，生物体内毒物积累情况又是如何呢？

毒物之所以会在较长时间内在生物体中蓄积起来，是因为许多毒物或是对脂肪有较高的亲和力而易溶于脂肪中，或是易与生物体内某些酶、蛋白质结合，从而较长时间残留于机体中。对于极性大的、易水解、易溶于水的毒物一般能较快地排出体外，很少在体内蓄积。当生物体所处的环境和毒物吸收进体内变化不大时，有毒物质在体内蓄积也随之上升，这部上升速率与环境中毒物浓度、摄入方式、生物物种、蓄积部位、毒物种类及体内毒物已有的浓度差别而存在有很大差别。不同的物种在同样毒物浓度条件下蓄积值差别也很大。为了反映这一差别，人们把环境有毒物质被生物积累、富集现象称为生物富集或生物浓缩，并把生物体内毒物的浓度 C_b 与环境中该物质浓度 C_e 之比叫做富集系数或浓缩系数。表5-3给出某些生物富集系数。

由表中可看到不同生物富集系数差别很大，小则几倍，大的可到几万倍。多数富集系数都远大于个位数。生物对环境中毒物富集并非无止境的，而是有一定限度。不同的生物有不同的阈限，当达到一定阈限时，体内蓄积的毒物被释放，毒物排出体外的速度将和吸收进体内的速度达到动态平衡，同一生物，在生命活动的不同时期内，生物体富集环境中有毒物质

表 5-3 某些生物对毒物浓缩(富集)情况
(实验平均值)

生物名称	毒物名称	水中含量 (ppb)	生物体内含量 (平均最高值 ppm)	大致 浓缩系数
海 藻	镍(Ni) 锌(Zn)			500 900
藻类、苔类	DDT	0.33	0.01	33
水生植物	DDT	20.00	31.0	1550
海洋植物	汞(Hg)	0.10	0.01~0.02	100~200
海洋动物	镍(Ni)			$3 \times 10^3 \sim 7 \times 10^4$
贝 类	锰(Mn)			$10^5 \sim 10^6$
大马哈鱼	DDT	20.00	4.05	207
鲫鱼(内脏) (肌肉)	总 666 总 666	1.61 1.61	3.237 6.669	2010 415
水生植物	放射性	0.72微居里*/升	(14天后) 4.3微居里*/公斤	60
			(20天后) 52微居里*/公斤	72
贝 类	放射性	0.72微居里*/升	(14天后) 60微居里*/公斤	83
蚯蚓 (A.rosea 小型)	丙体666 总DDT	土壤中浓度 4 930	4.25 2.78	1063 3

* 1 微居里 = 3.7×10^7 贝可[勒尔]

或化合物的速度量值是不同的。通常，当摄取毒物条件不变时，在达到蓄积阈限前，生物体内富集的毒物是在不断增大，即富集系数不断变大，人们称这一现象为生物积累。特定生物在每一发育生长阶段，对特定毒物在体内的积累量都有最高值。如图5-9所示：曲线L是生物体内有毒物质积累

的可能形式之一。它是毒物摄入量、生物体状态及环境因子的函数。在环境、摄入毒物和生物体状况基本不变时，L 曲线近似于逻辑斯谛曲线。曲线上端趋于稳定点，它是生物体摄入毒物与排出毒物达到动态平衡的点。当生物体脱离了毒物环境或环境内毒物浓度明显下降、或是摄入毒物量明显下降时，则被生物体早先积累的毒物就会以某种方式开始释放回环境。它们将在不同程度上被生物体以新陈代谢方式排出

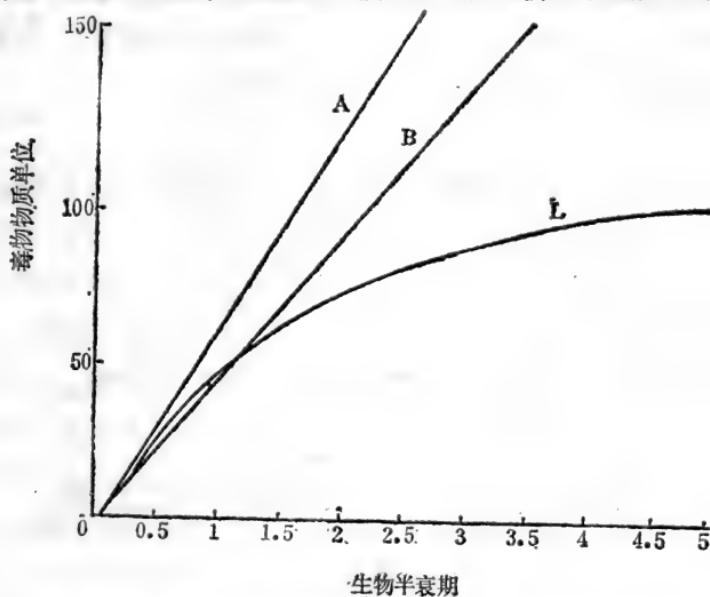


图5-9 毒物进入生物体内的摄入、吸收、蓄积的可能曲线。
A 摄入量曲线，B 吸收量曲线，L 为体内蓄积曲线。

体外，转化成其它无害物质，使体内的毒物积累值明显下降，有的甚至可完全排出体外。人们把有毒物质降到最初摄入量一半所需时间称为生物半衰期（简称BHL）。生物半衰期与生物积累毒物的最大值一样，取决于生物种群状况和生物所处的各种环境因子。这是因为对于活的机体来说，代谢活动贯穿于生物的一生，当生物摄进毒物后照样发生氧化、

还原、降解、络合、脂溶、水溶积蓄和排出过程，这些过程是随着自我状态与环境因子差别而变动的，所以就有上述的差别存在。并且不同的物质蓄积在不同组织中其半衰期也不相同。例如镉在肾脏中半衰期为18年，在心脏中为9.3年。有报导说镉对虹鲑鱼污染试验中，当去除污染因素42天后，体中积累的镉只有初值的1%。鱼类排泄毒物速度还明显地同温度有关，有的种类鱼在15℃时汞的排泄速度为4℃时的2倍。图5-10表示在一定温度下用DDT、狄氏剂、六氯联苯、四氯联苯喂养鱼类后，它们在鱼体内的降解情况。

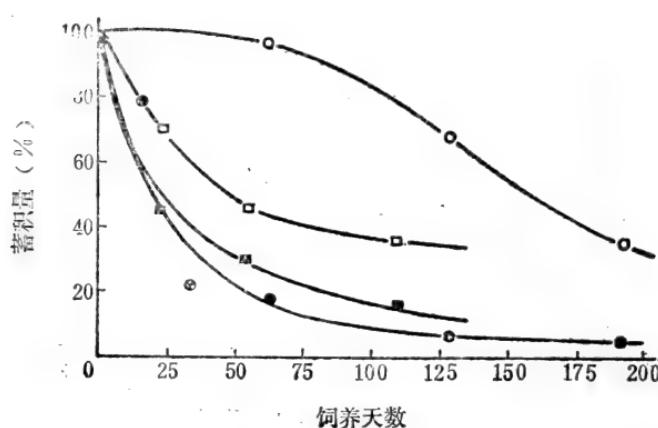


图5-10 喂金鱼DDT、狄氏剂，喂银大麻哈鱼多氯联苯后，它们在鱼体内的降解情况。○：DDT，●：狄氏剂，□：六氯联苯、■：四氯联苯(DITri 1974)

对于鱼类在水中释放毒物的速度，有人用已蓄积有总体六六六的花白鲢做实验，得出花白鲢在清水中总体六六六释放百分率和时间关系的数学模型为：

$$R = b (1 - e^{-c_t k_{et} t})$$

R 为总体六六六释放率， c_t 为温度， k_{et} 为释放系数， t 为在清水中时间， $b=100$ 或释放水体中某一总体六六六残留水

平的可能最高值。释放系数 k_{st} 与温度关系密切，在花白鲢实验中，当 $c_s = 23^\circ\text{C}$ 时， $K_{23} = 0.034$ ， $c_t = 32^\circ\text{C}$ 时， $K_{32} = 0.0072$ 。这表明随着温度上升，鱼类的新陈代谢速度加速，从而释放速度也加快。

表 5-4 DDT在食物链中富集作用情况

食物链	水	浮游生物	小鱼体内	大鱼体内	水鸟体内
DDT含量 (ppm)	3×10^{-5}	0.04	0.5	2.0	25
浓缩系数		1.33×10^3	1.69×10^4	6.67×10^4	83.33×10^4

对许多高等动物来说，在一般环境条件下，体内毒物来源的重要渠道是由消化道，即所谓的病从口入。实际上，在早期的研究中对食物链上高营养级动物，人们特别重视的是食物链上毒物的富集与积累，往往忽视了其他渠道毒物进入体内的作用。现在研究表明，即使对于营养级顶端的动物，毒物来源主要是来自食物链还是来自其它渠道均须视物种、毒物、环境条件的不同而有区别。表5-4是说明一类生物在生物链上浓缩系数变化情况。可以认为鸟类体内蓄积的DDT主要是从食物链而得，而大、小鱼则不尽然，原先认为大鱼毒物来源主要原因是食用小鱼而得。现在研究证明，至少有相当一部分水生动物体内毒物系直接来自水溶液中有毒物质。例如有报导指出，鲸鱼体内DDT蓄积量60%来自水体，30%来自饲料。

因来自食物链的毒物积累而导致灾难性事件的著名例子有上面所说的日本水俣病和美国明湖地区的鸟类死亡。分析表明，因食鱼使鸟类体内DDT含量为湖水的765,833倍。图5-11表明沿鹈鹕食物链而来的生物污染值的变化值。

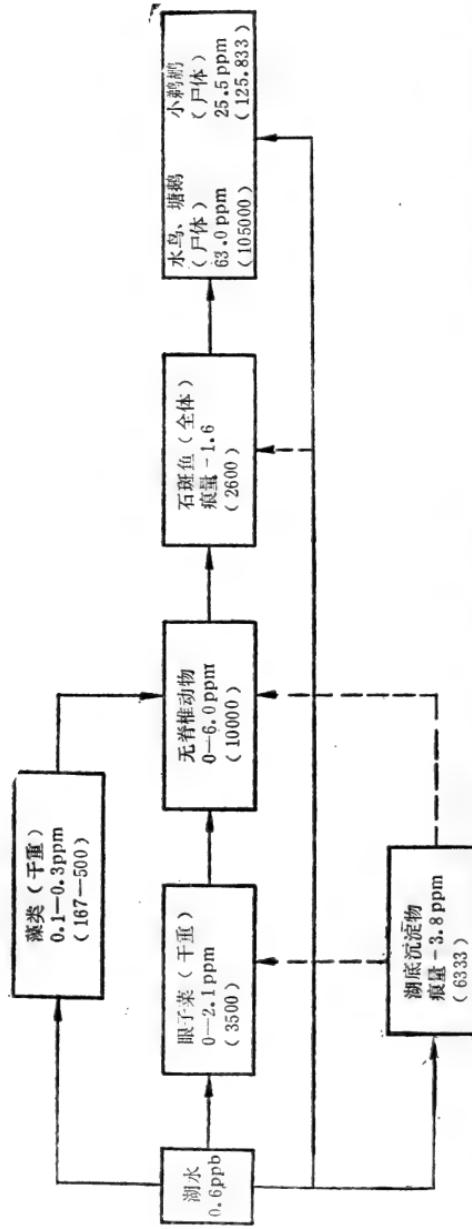


图5-11 美国加利福尼亚东北部明湖 (Tule) 和下克拉马斯 (Lower Klamath) 保护区中, DDT 依食物链富集传递情况。(图中括号内为浓缩系数, 痕量指含量为0.1ppm以下, 图中生物在湖里尸解后的 DDT 还可返回湖中与沉淀在湖底中。)

大气中毒物可经植物叶部或其它地上部分进入植物体内。例如氟化物可经叶面气孔进入植物体并经叶缘转移、积累。当环境中氟化物浓度不变时，植物体内氟化物将随着时间推移而递增。氟化物也可经树枝进入体内。如据一化工厂区对杨树皮的测试，对着氟化物源的杨树，从初春坏死的白杨树叶上测得含氟量达2000ppm，白杨树皮为1000ppm，木质部为69ppm。对于植物来说，毒物的富集更多的是来自土壤和溶解于水中的毒物。

总之，即便环境中毒物浓度较低，而随着时间的推移，生物体将以直接吸收或从食物链上吸收而把环境中有毒物质在体内富集起来。在这富集过程中，生物体本身也将通过新陈代谢活动把体内毒物进行生物转化，有的毒物被蓄积于体内，有的被排出体外。当环境浓度和生物体吸收方式不变时，体内毒物将随时间的推移，积累量逐渐增加，直到与环境间达到动态平衡。一旦生物体停止吸收外来毒物，对活的机体，体内该毒物积累量将逐渐下降直至消失。生物体内积累毒物量值大小依物种、生物大小、年龄、生长发育情况及毒物特性而定。

(六) 某些毒物、污染物的危害与毒物 联合作用对生物的影响

重金属、各类化合物、农药对生物体的伤害主要属化学性危害，在环境污染问题中，这类物质的危害占有主导地位。其原因是这类污染严重地影响甚至改变了生物的环境条件，从而导致赖以生存的传统生物生理活动受到不同程度的抑制、干扰、破坏，使生物的群落结构、种群、个体、直到

细胞、各类氨基酸、酶、遗传密码等发生变化，有的生物能适应新条件而兴起，有的传统物种则衰落直至灭亡，从而对人类产生深刻而严重的影响。表5-5列出一些物质在达到一定环境浓度，且在通常环境物理生物因子状态下对生物的危害。这里所说的均是各物质在超过规定标准时对生物单独作用的结果。对于多个毒物共同作用于生物体，其结果迥异。有独立、加和、协同、拮抗等结果。为了对这些概念做进一步的介绍，我们先解释两个名词。

半数致死量：在一定时间内（一般取24小时）使受实验动物半数死亡的毒物剂量，称半数致死量，用符号LD₅₀表示。

半数致死浓度：在一定时间内（一般取24小时）使受实验动物半数死亡的浓度称半数致死浓度，用符号LC₅₀表示。

1. 拮抗作用：两种或两种以上毒物同时作用于生物体，其结果使每一毒物对生物体作用反而减弱，这种毒物间相互干扰作用称拮抗作用。俗称“以毒攻毒”。其形式似化学反应中的中和反应，当然并非同样。李时珍“本草纲目”中“解砒霜毒”，“解硫磺毒”是铅与砷、铅与硫的拮抗作用。此外，如硒与镉、锌与镉、锌与铜、汞与硒等均有拮抗作用。正是这种拮抗作用，使得某些严重的汞污染区中，因有硒的存在而使汞对人体未能形成严重的影响。同样的道理，在某些严重的氟污染区内，没有发现生物体有严重氟中毒现象，其原因可能是因铅、硼等元素在该地区存在。

在拮抗原理的研究中，有人提出假说：物质在生物体间或是在生物体内的有机基团上发生化学反应或生化反应。如可观察到汞、镉等元素直接与硒反应生成硒化汞(HgSe)，硒化镉(CdSe)等化合物，可使硒(Se)失去毒性。由于镉比锌和硫基结合稳定，这样镉能把与硫基结合的锌置换出

表 5-5 一些毒物在超过一定标准值时, 对生物体的影响
(正常情况下, 单独作用时)

毒物	植 物	人 和 动 物
汞(Hg) 及其化合物	汞蒸气或汞化物热解的蒸气尘埃等对植物叶、芽、茎、花瓣等可造成伤害, 较高浓度灌溉时, 可对植物造成伤害。	可致人职业病, 引起肝炎、血尿等疾患、引起水俣病。损害细胞内酶系统、中枢神经系统。可有遗传性损害并致畸。可使鸟类繁殖减少、致死。
铅(Pb) 及其化合物	较高浓度铅, 可影响植物光合作用, 蒸腾作用, 并使作物产量降低。	对肾、心脏造成损害, 并可致头部、肌肉、关节和造血系统、神经系统疾患, 使发育迟缓, 可致动物死亡。
铬(Cr) 及其化合物	低浓度铬对植物有益, 高浓度时对植物生长发育有害, 并可致死, 尤其是对水生生物。	较高浓度可致癌, 致过敏皮炎, 湿疹, 胃肠道炎, 溃疡性疾患, 可致水生鱼类死亡。
镉(Cd) 及其化合物	过量镉可使作物产生黄萎病、枯死、生长迟缓、产量下降。	镉在体内积累, 可得骨痛病, 引起动脉高血压, 低浓度镉可对鱼类产生毒性。
砷(As) 及其化合物	较高浓度砷, 可使作物根系变色、产量降低、叶子萎蔫、枯死。	较高浓度砷化物使酶系统破坏或失去作用, 引起神经系统、毛细管等功能与器质性病变, 有致癌性。高浓度时很快死亡。
氟(F) 及其化合物	较高浓度时, 干扰酶作用, 阻碍代谢机能, 破坏叶绿素和原生质, 使叶子枯萎等。	较高浓度时致骨质硬化、疏松、哮喘、气管炎等。使物质代谢紊乱, 得牙疾患等。
氰化物	较高浓度氰化物可使植株干枯、死亡等。	较高浓度时, 可致人、畜死亡。低浓度时, 可引起头痛、心悸、失眠。
酚类	高浓度时破坏植物细胞渗透性, 使植物变形, 抑制植物生长。	低浓度时, 致人头痛失眠、腹泻、皮疹、贫血、肝肾损害, 甚至精神损害, 较高浓度时, 使鱼类、贝类中毒死亡。

续表

毒物	植 物	人 和 动 物
酸雨 (主要成分为 SO_3 、 SO_2 和 NO_2)	使植物生长缓慢、早落叶、生长率下降，较高浓度时，可使植物叶片脱落枯死，抑制植物光合作用。	水域酸度提高后，使水生生物发育、繁殖、生长受到严重影响，使水生生物结构发生变化，最终导致绝大部分生物或全部水域中生物绝迹。
农药 (有机氯、有机磷等)	影响浮游生物光合作用，有的农药在达到一定浓度后，可使植物枯萎、卷叶、落果、畸形矮化，种子发芽率低等。	有机氯农药：有神经毒性，诱发肝系酶，使人体代谢受影响，致痛，使人贫血，肝、肾损害等，使鸟类死亡，影响繁殖，抑制鱼卵黄形成。有机磷农药，多是剧毒、致畸、致癌、致人死亡。

来。某些毒物在机体内的络合物中相互取代的机理现正在研究中。

2. 独立作用：有毒物质在机体内的作用互不干扰。但常出现一种有毒物的作用使机体的抵抗力下降，而使另一种毒物再作用时毒性明显增强。习惯上对多种毒物单独作用于生物体的结果可用下式估计：

设毒物单独作用于生物体的死亡率为： P_1, P_2, \dots, P_n 。
则两种毒物作用于同一机体死亡率为： $P = 1 - (1 - P_1)$

$(1 - P_2)$ ；一般的，两个或两个以上毒物作用于机体的死亡率为：

$$P = 1 - (1 - P_1) (1 - P_2) \cdots (1 - P_n)$$

这里 n 表示有几种毒物作用于同一机体。

3. 协同作用：指两种或两种以上毒物作用于同一机体时，毒性明显被相互增强。例如：有的毒物可以明显地使另一毒物进入机体能力增强或是使另一毒物降解、排泄受阻或是产生毒性更高的代谢物。象农药草硫磷能抑制肝脏中对马拉硫磷起降解作用的酯酶活性，使后者毒性增强。

4. 相加作用：指机体受到多种毒物作用时，各毒物对机体的作用可按一定比例做出贡献的和。假设各种毒物的半数致死量为 $LD_{50}(a)$, $LD_{50}(b)$, ..., $LD_{50}(n)$, 作用于机体的毒物比例值为 π_a , π_b , π_c , ..., ($\pi_a + \pi_b + \dots + \pi_n = 1$) 则有关系式

$$\frac{1}{LD_{50}(\text{混})} = \frac{\pi_a}{LD_{50}(a)} + \dots + \frac{\pi_n}{LD_{50}(n)}$$

例如：毒物 a 两份与毒物 b 一份混合使用，并且 $LD_{50}(a) = 3$ 毫克/公斤, $LD_{50}(b) = 5$ 毫克/公斤，则

$$\pi_a = \frac{2}{1+2} = \frac{2}{3}, \quad \pi_b = \frac{1}{3}, \quad \text{这样代入上式可得}$$

$$\frac{1}{LD_{50}(\text{混})} = \frac{\frac{2}{3}}{3} + \frac{\frac{1}{3}}{5} = \frac{2}{9} + \frac{1}{15} = \frac{13}{45}$$

$$LD_{50}(\text{混}) = \frac{45}{13} \text{ (毫克/公斤)}$$

上面四点主要是根据经验而得。实际上任何毒物对生物体的作用随着作用时间、浓度和生物物种的种类、年龄、性别、生长发育大小的不同而千差万别，并且与生物所处的各种物理、化学环境也密切相关。上面经验所得到的四点均是指与在单独作时，在环境、毒物、物种本身特性基本相同的条件下联合作用的四个可能结果。在多个毒物作用于不同的机体时，这四个特点往往是交叉作用，其结果就可能与这四个特点相差甚大，这些应看具体问题而定。

(七) 物理污染、生物污染对生物的影响

随着文明的进步，人类生活的环境不但受到严重的化学

性污染的侵害，并且还越来越受到物理性污染。如噪声、热污染、电离辐射、电磁辐射等。

噪声污染指由机械运转或生物生命活动过程中向环境中释放出的弹性波，它能产生危害，干扰人们的生活和生理活动。噪声被列为现代七大公害之一，噪声病已成为现代医学名词。噪声污染对于植物危害虽不清楚，但对于部分动物，尤其是一部分高等动物的听觉、内脏和中枢神经系统均能造成损伤和病变。其危害顺序是神经系统，心血管系统和消化系统。据测定，40分贝噪声即能改变人睡眠的脑电波，长期处于80分贝的环境中即能引起神经衰弱症，使人头痛、失眠、记忆下降、多梦。130~150分贝能引起动物听觉器官损伤和内脏器官病变。在150分贝以上可使某些动物内脏器官损伤并导致死亡。例如，在165分贝噪声环境中，大白鼠互相撕咬、狂跳、抽搐直至僵直躺倒。这是强噪声引起的生理性癫痫；在大于162分贝的强噪声中，人们观察到豚鼠中耳损伤严重，鼓膜轻度出血和损伤。把在强噪声中试验的豚鼠进行解剖，可发现豚鼠内脏诸如肺叶出现大面积瘀血、胃部破裂、盲肠瘀血、出血等症状。据报导，在170分贝的噪声环境中，仅6分钟受试豚鼠就死亡一半。噪声影响人们谈话、睡眠是尽人皆知的。噪声还影响人们的肠、胃运动，心血管系统等。长期生活在强噪声中可使肾上腺肥大、扩张，影响新陈代谢；使心律不齐、血管痉挛，血压上升；可使唾液、胃液、胃酸分泌下降；使人易得胃溃疡和十二指肠溃疡；使内分泌系统紊乱；使供应胎儿的血管痉挛、收缩、影响胎儿营养；噪声使人耳聋。据统计，在高噪声环境中工作的人，哮喘、溃疡、肠胃炎、冠心病、动脉硬化症的发病率比噪声较低环境中工作的人发病率高得多。在90分贝以上噪声中职业工作十

年以上者，休息时其脉率平均比正常人值低5~9次/分，而舒张压平均升高4~9毫米汞柱。

电磁辐射是指由电磁场形成的电磁波向空间传播的现象。波长为 6×10^5 厘米~ 10^{-22} 厘米，光波多属此范围。因此电磁辐射污染包括有光污染。电磁污染有天然的和人为的两种，天然的有雷电产生的强电磁波、太阳黑子活动和地震产生的电磁干扰及某些类型的光波。人为的则有大功率电机及变压器产生的磁场、高压电缆、广播电视、雷达、微波传送中产生的电磁波。电磁污染能对动物和人造成直接危害，并使生物生理行为发生异常。由雷电、太阳黑子活动产生的电磁波对电磁通讯的干扰人们早就注意到，而它们对生物的影响，人们相对地较为忽略。但随着科技的进步，人们使用电磁辐射技术越来越多，许多人长期处于电磁污染中，问题就逐渐暴露出来了。早在二次世界大战期间，人们就发现雷达操纵员普遍患有神经衰弱症，并观察到在高功率的雷达波束照射下导致某些动物死亡，人们称为雷达危害。随着现代技术的发展，电磁辐射对人类、生物危害的研究也日益受到注意，初步研究表明：

1. 对于高等动物，当微波辐射达到一定量后，可使细胞渗透性发生改变，蛋白质变性，心律不齐等。长期受微波作用后有高血压病和低血压病倾向。有报导说，甚至在高压线周围产生的电磁波也能影响人和动物生长。离照射源90~100米处即可观察到血液、生理、脉搏的变化，即使用正常电器产生的电磁波来照射猴子也能使猴子产生时间紊乱。电磁波还能使高血压、心脏病发作，头痛，性机能衰退等。一些试验表明，许多生物对强磁场中脑电图发生异常；猫每天6小时暴露在200~300高斯（1高斯=10⁻⁴特〔斯拉〕）磁

场中，20天后即出现神经胶质组织反应；小鼠在5000高斯磁场中三天，血液中钙元素等就发生变化；在高压电场中每天暴露两小时的兔，两个月后发现在强度10~20万伏/米电场下可引起兔心功能中度损伤。试验材料中还发现，电磁污染偏重于对酶细胞结构产生影响，可致遗传、染色体发生畸变。

2. 电磁波中较短波长的紫外线有杀菌作用，紫外线波长一般为2000—2750埃（1埃 = 10^{-10} 米）。一般来说，波长越短，紫外线的杀菌能力越强。较长波长的紫外线具有预防、治疗佝偻病的作用，但某些波长的紫外线作用下可出现皮肤红斑；而红外线则能加温机体，强度较大的红外线照射可使恒温动物的体温调制机制出现毛病，时间较长或强度较大的红外线照射可使体表产生烧伤，还可引起热射病和日射病。

由于电磁波可以引起生物的各种生理生化反应，影响机体调节，所以近十多年来，美国实验用光电来防治病虫害。无线电波可防治粮食中某些病虫害，如利用小麦害虫对电磁波的敏感性，用一定波长的无线电波可有效地防止仓库小麦害虫。利用电磁波的热效应使稻谷升温来杀死米象。

电磁波对生物生理干扰原因之一，可能是较强的电磁波干扰了地磁场在生物体中的作用，从而干扰了生物体内的生物钟，使生物体内的抵抗力下降而致病。对于极强的电磁波，如激光，它可危害眼睛，使眼球组织中水分蒸发而严重损伤组织，并致蛋白质变性，视网膜下出血，更强的激光束可使人化为灰烬。应该指出：许多电磁辐射机理还不清楚，但它污染而导致对生物的危害越来越严重，正越来越受人们重视，并加以研究。

电离辐射。凡是有足够能量使物质分子发生电离的电磁波称为电离辐射。例如： α 、 β 、 γ 、X射线和质子束。来自

宇宙的电离辐射为宇宙射线，主要由高能质子、正电子、光子、介子等组成。众所周知，上述各类电离辐射在达到一定强度后对生物体会产生一定的威胁。由于天然存在有铀、钍系元素及宇宙射线照射的原因，所以生物是生长在低浓度的电离辐射环境中，且能适应之。除偶然事件外，人们对天然存在的低强度电离辐射不大注意。人们较为注意的是人为放射污染。这种污染源主要来自原子能工业的放射源，放射性废物的排弃，核试验产生的放射性以及工业、科学、医用、发光涂料、电视显象等产生的辐射。

在近几十年中，电离辐射污染远较其它物理污染研究得多，这是因核爆炸问题引起的。广岛、长崎的灾难使人对电离辐射谈虎色变。在许多试验点进行有关放射性辐射效应，及从室内到野外进行广泛的有关放射性对生物影响的试验。图5-12是 γ 射线对生物影响的试验结果，图5-13是受辐射后的生境状况。

放射性物质象许多毒物一样可被生物富集，这种富集主要是通过元素代谢使体内组织受到结构性污染。对于动物和人，既可直接受环境放射源危害（穿入机体），又可受到因食物而带来的放射性污染。例如放射性物质由食物链进入人体，随血液遍布全身；有的放射性毒物在体内可达五千天以上。

现在一般认为，电离辐射效应主要是生物因受电离辐射污染后，活质原子产生电离，即射线使细胞内许多水分子电离成 O^{2-} 、 OH^- 、 H_2O_2 等具有很强氧化作用的氧化剂。这些对生物体内各组织均有较高的毒性，它使含硫氨基酶失去活力。受电子辐射后，体内核蛋白结构、核蛋白、脂类均可发生损害。在低强度辐射时，一般生物体均有自我修复的能力，所以危害性难以觉察。但对于高强度辐射时，情况就不一样

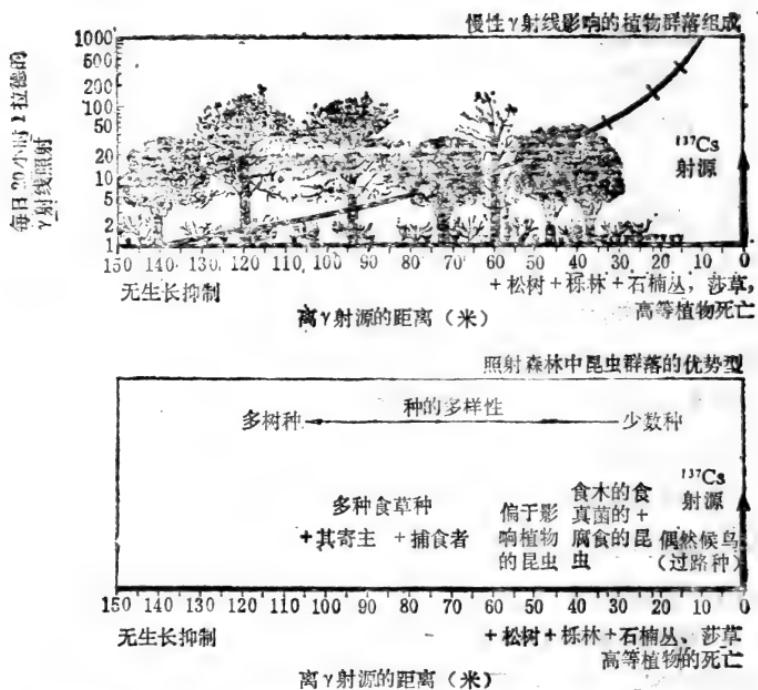


图5-12 栲-松林对 γ 辐射从高水平起的梯度反应。
固定射源每日照射20小时，延续两年。(纽约、长岛勃罗克海文国家实验室，Odum, 1970)

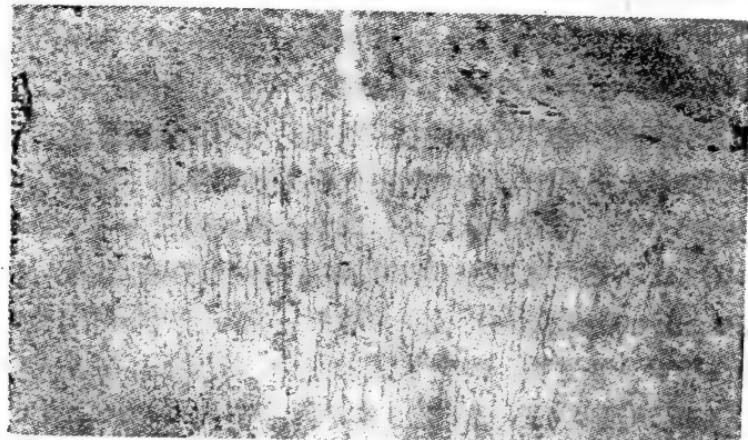


图5-13 辐射作用影响环境 (在布鲁克海文国家实验室森林中受到辐射的一个小区里，树木遭到破坏，比较粗壮的杂草还活着，而生态平衡已改变。Weihberg 1974)

了。据试验，小白鼠用800伦琴（1伦琴 = 2.58×10^{-4} 库仑/公斤）强度的 γ 射线照射后，有50%在3~4天内就丧生。在通常环境条件下，动物较植物远为敏感，温血动物比冷血动物敏感。即使对同一物种来说，因受辐射侵害部位不同和个体发育、生长期不同而有所差别。在中等辐射剂量条件下辐射一定时间后，即能引起辐射病。最常见的有造血器官、淋巴组织、肝细胞、骨髓、染色体遗传等病变及白血病、精子变性、胎儿畸形等。利用放射性对生物体致病的机理，使放射性在生物防治中发挥其应有的作用。

热污染系指热对正常环境的干扰。它来源于多方面。最常见的是人类活动中直接向环境放热。这里最主要的是工农业生产活动中大量消耗能量后逸向大气、水体中的热。此外还有因人类耗能过程中使空气中二氧化碳增加，结果改变地球接受辐射能和地球向外部释放辐射能的能力，从而有可能产生温室效应，使整个地球温度升高，这是人类活动间接地产生的热污染。另一人类活动的间接热污染是地球表面植物状况的改变和沙漠化，草地、森林的减少改变了环境的热交换能力，使地球的热平衡交换受到破坏，这些属人为的热污染。还有一类自然的热污染，如火山爆发，灰尘蔽日，影响地球与外界的热交换。热量、能源的异常变动，使生态环境中物种由个体、种群到生态系统均发生变动。热污染的重要标志是环境温度发生异常变动，它对生物的影响包括上章所说的温度对生物的影响。当然因温度的变化也引起环境因子的变化。如水中溶解氧随着温度升高而减少，在5℃时溶解氧为20℃的1.5倍，这就引起水生生态系的大变化。华盛顿州沿岸调查表明：当夏季水温较正常值升高0.5℃时，能使有毒的浮游植物大量繁殖。特别是对鱼类，局部热水的排放

常影响到该区域冷水鱼类的存亡。水温升高，溶解氧降低，鱼类代谢率提高使冷水鱼在新环境中发育受阻，并导致死亡。据研究，热带水中的动植物，夏季水温常接近热死阈值，水温稍微升高都将导致它们丧生。如袋鼠小虾，当水温超过31℃时即会死亡。

环境的热污染不但对水生生物影响很大，对许多变温动植物都有很大刺激。全球性的温室效应将使整个地球生物区域分布有很大改变，低纬度的变温动物向高纬度地区移动。使变温生物种群的数量、群落特征发生变化。这些变动将影响到恒温动物的取食，对恒温动物的生存、生活习性、种群数量、生态系均有所影响。环境的热污染在过去只是在有限区域中受到重视，随着社会的发展，用电量的增加，热电站、核电站等热污染源增加及温室效应；热污染对生物圈的影响必将越来越受到人们的重视。

石油污染，指石油或石油制品在开采、炼制、贮存、运输、使用过程中进入环境造成的污染。石油是各种烃类化合物的混合物。因此它具有烃类化合物的毒性，例如低沸点的饱和烃能使动物、浮游动物麻醉；当这类烃浓度较高时，能破坏细胞并引起细胞坏死。另方面，石油破坏生物生存的物理环境，造成生物机能障碍。就现有资料看，石油污染主要危害对象是水生生物。油膜使大气与海面的气体、液体交换隔绝，减弱了太阳辐射能，使水生生物光合作用受到影响。海洋中油膜还沾污了海鸟羽毛与海兽皮，使这些动物飞行、保温、游泳能力均受到影响。据1952~1962年间统计数字，在整个北大西洋与北海区系中，因石油污染而死亡的海鸟高达45万只以上。估计因1967年3月在英吉利海峡触礁的海轮造成的石油污染，死亡海鸟约有2.5万只。粘度较大的石油还

堵塞水生生物的呼吸系统，而导致其死亡，在美国圣巴巴拉油污事件中，发现在该海域中有四头海豚和五头鲸鱼因油块堵塞鼻孔而死亡。油膜使鱼虾窒息而死，油污还能粘住鱼卵、使幼鱼丧生。对潮间生物，油污也是巨大的威胁，它损害软体生物生理机能而使其丧命。在含油浓度为3~4%时，牡蛎一周内可致死。在一些油污事件的区域中，整片的海岸表面固着生物被1至2厘米厚的油污所杀死。因漂油上岸使针叶树和灯芯草枯死。石油因是化学物质，在水域中它同样可进入鱼体，为鱼体所富集。被吸收的烃类物质往往比较稳定，通过富集积累经食物链进入人体，其中不乏致癌物质。油污还严重影响该区域中生态系。这是因为油污可使该区域中浮游植物数量大减而导致食物链比例失调，从而使生态平衡发生变化。油污减少了水体溶解氧，使水域中厌氧生物兴起和好氧生物的衰减。一般水域中受油污后需经6至7年后生物群落才能恢复到正常水平。油污主要经海洋生物、微生物对石油烃起分解吸收等作用而达到净化。近年来，人们在研究用各种化学、物理方法使油溶解，使之在较短时间内消除而使受污水域尽快恢复到正常状态。

生物污染系指影响各种生物产量、质量、使正常生态系统发生变化和危害人类的生物影响。生物污染说到底是生物间的相互关系。生物污染可存在于任何地方。大气中充满了各种使人、动物致病的细菌、微生物、病原体、大大小小的物质中都存在着或多或少的细菌。因此，对于生物污染可谓无所不在，无处不存。已有许多专门著作论述各类危害人、生态系和生物圈的生物种群。特别是常见的细菌、病原体等，这里简单介绍一下水体中因氮、磷过量导致的富营养化——某些菌类，藻类过量繁殖造成的污染。

水体富营养化系指因水体中氮、磷、钙等营养物质大量增加使某些浮游生物迅速繁殖的现象。富营养化有自然的和人为的。在自然条件下也可发生富营养化沉积物，水体逐渐为沼泽地所代替，使沧海变桑田，这一过程常经历若干世纪才完成。现在人们所说的富营养化主要是指人为的生活污水、工业污水排入水域；或人为的植被破坏，因水土流失而把营养物带入水域；或施用的化肥流入水域等原因，使河口、湖泊、海湾中因营养过量而在短期中引起浮游生物迅速繁殖，从而导致水中溶解氧大幅度降低，促使生活于其中的其它水生生物大量死亡。这种死亡原因有的因过量浮游生物繁殖堵塞水生生物呼吸系统而引起窒息；有的因水中溶解氧太少而死亡；有的因食物链破坏而毙命。例如1971年夏天美国马萨诸塞州的利斯河口因富营养化导致几百万尾稚鲱和50万尾对虾死亡，美洲鳗、白鲈等也大量死亡。在该河口，两种无脊椎动物和九种鱼近于灭绝。我国的一些水库、河口同样存在富营养化问题。在富营养化问题中，因水域中营养组成不同及其它生境条件的差别，使水域中不同的浮游生物占优势。这些优势种的大量繁殖使水域的颜色与各优势种颜色相近似。赤潮是由红色的浮游生物鞭毛藻类、硅藻类、原生动物等组成。在我国天津附近及南海已多次发现赤潮。在淡水富营养化区域中，更多的是由兰色的浮游生物组成。富营养化的水中往往富含有硝酸盐和亚硝酸盐，使人、畜饮用后致病，并有致癌可能。在富营养化水域，彻底破坏了该水域中原有的生态系。在一些地区，治理富营养化水系已成为重要的课题，越来越受到人们的重视。

六 环境污染的生物治理

(一) 生物对毒物的作用

我们谈了毒物在生物体内迁移、循环、转化过程。环境中毒物被生物体吸收后，从量值上看，环境中毒物浓度自然是降低了。从质上看，毒物进入体内后经一系列分解、合成过程，有的被生物体本身所利用，有的被水解，有的是去其糟粕存其精华。绝大多数未被生物体利用而排出体外的毒物，其毒性都有不同程度降低，一般是水解性增强，危害性减少，毒性有所降低。当然，任何事物都有例外，也有些毒物进入体内后毒性不变或反而增强。如金属汞转化成甲基汞即是毒性增强的一例。总结上章所述，环境中生物吸收毒物后所起的作用有下述几种：

1. 生物体对毒物来说只是一个通道，吸收毒物后不经任何转化即排出体外。

2. 有的毒物、污染物与生物所需营养物质相类似，它可以加入到营养物质代谢过程。在低浓度时，它可把毒物、污染物全部吸收进生物体内；在浓度较高时，可部分地吸收人体内和部分地以各种方式被排出。

3. 毒物进入体内后很快与体内物质结合后排出体外。

4. 毒物、污染物经氧化，还原，水解后再与其它物质结合后排出生物体外。

5. 毒物、污染物经体内氧化、还原、水解后排入环境。

因为生物对毒物的作用有上述机能，促使人们注意到用

生物净化被化学性污染的环境。在环境净化中，人们对微生物、植物的特殊作用最为注意。这是因为微生物中藻类、原生动物、细菌等分布广，种类多，繁殖快，多数对污染物具有分解、化合作用，能使毒物毒性降低或消失。植物则有特殊净化空气污染的作用。不过生物净化环境毒物、污染物的作用不仅取决于生物的特殊性，也取决于毒物的种类、水溶性和生物体内的转化途径。

（二）生物监测和指示生物

不同生物物种对环境毒物、污染物及其含量有不同的反应和变化，人们利用生物对环境毒物、污染物的反应变化及变化程度作为监测评价环境质量变化、受污染程度的依据称为生物监测。而被用来监测评价环境质量及其变化、污染程度的生物称做指示生物。本世纪初德国科学家科尔克威茨 Kolkwitz 和莫尔斯松 Marsson 就提出污水生物体系概念，由此发展出用指示生物评价水体污染和净化程度的理论。现在不少部门已用指示生物作为监测气象、水土、周围环境污染程度。现在所指的指示生物包括自然指示生物、活性污泥指示生物和有毒物质指示生物等。生物监测则包括生态环境变化，生物个体急性、亚急性、慢性的毒性测定，生物的生理生化分析，有毒物质、污染物在生物体内循环运转的分析，个体生态状况以及群落生态结构变化分析等。下面分大气污染生物监测，水体污染生物监测和土壤污染生物监测进行分析。

1 大气生物监测

大气污染的生物监测包括动物监测和植物监测。一般动

物流动性较大，管理上也存在一定困难，所以用动物来监测大气并不普遍，也还未形成一套完整的监测手段。据国外报导，日本有人用鸟类、昆虫类的分布来监测环境污染变化的区域。美国对一些污染事件调查表明，家禽对二氧化硫反应最迟钝，狗较好些，金丝雀最敏感。人们较多的是用植物作为监测环境大气质量变化的指示生物，主要方法有：

（1）直接利用植物受害情况，对大气质量变化做出判断。如。当二氧化硫的浓度达到一定值后，在阔叶植物上就可以观察到叶脉、叶缘的组织颜色呈黄色或白色的坏死。在低浓度时可出现老叶绿色变淡，细胞组织受损状况。人们较多的应用阔叶植物监测空气中二氧化硫含量其根据即在此。氟化物气体侵害阔叶植物时，往往先在叶尖、叶脉间出现小斑，呈现组织坏死症状，对禾本科植物则叶尖先坏死。唐菖蒲对环境中二氧化硫、氟化物的敏感即呈现上述特点。因此它被用来作为环境中二氧化硫、氟化物质量变化的指示生物。随着人们研究空气污染物与某些敏感植物的深入，还把一些气体浓度对植物定性反应定量化、标准化，并依此做成生物监测器。但相对来说，植物对空气中某些污染物反应较仪器检测时间长些。

（2）我们已知大气中污染物、毒物多是从叶面、表皮进入植物体内并积累其间。人们利用叶片表面的这种富集、积累性质，测定叶片、表皮甚至木质部中的毒物、污染物含量来判断空气污染程度。如。人们测定了许多植物自然含氟量为 $0.5\sim0.25\text{ppm}$ 。当植物叶中氟的含量超过上述值时，即可考虑植物受氟化物污染、由植物叶面积累量大小来判断环境中氟化物污染程度。有人利用大叶黄杨的含氟量大小定性地监测氟污染程度。

(3) 利用苔藓植物、地衣做生物监测。相当广泛的大气污染物如二氧化硫、氟化物、氯化氢等均可用苔藓植物、地衣做监测。当大气中二氧化硫含量仅为 $0.015\sim0.105\text{ppm}$ 时，能使地衣死绝。浓度超过 0.017ppm 时，多数苔藓植物无法生存，正因为地衣、苔藓植物对大气污染物的敏感反应，所以1968年在荷兰举行的大气污染对动植物影响的大会上，人们推荐地衣和苔藓植物做为监测大气污染程度的指示生物。用它作监测时主要是根据地衣、苔藓植物种、数量分布的变化，频度，盖度及它的内部、外部受害症状做判断。这种监测可以是观察自然种变化，也可用移植方法观察上述变化。在实践中人们观察到，大气污染严重的地区、地衣、苔藓植物基本绝迹，而各种耐污染种开始出现。为了反映这一变化，人们给出空气清洁指数概念。设在某区域中观察到地衣种数 k ，每个种的频度—盖度为 f_i （ f_i 由观察者自己确定，用数字表示）每个种平均数量 Q_i ，则有（无量纲）

$$\text{IAP} = \frac{1}{K} \sum Q_i f_i / 10$$

（这里10只是方便起见，无生物学意义），IAP数值大，污染不严重，空气清洁。有人曾用IAP值给出加拿大安大略地区的二氧化硫污染情况。移植监测方法是把非污染区中附生在树木上的地衣或苔藓植物连同基质在一起割取下来并制成一定规格生物片挂在地衣、苔藓消失的污染区中，然后定期观察受害等况并与标准变化相比较；以用于监测当地的大气质量。

(4) 根据植物体在一定的大气环境中生理生化反应来做生物监测。例如，有的人研究酶系统变化和发芽率变化来做大气污染程度的指标，并用它对大气污染长期效应做判断。

据报导，有人利用树木生长量，年轮变化等来对当地空气质量现状和历史上污染程度做判断。

(5) 利用植物群落变化作大气监测。因不同植物在大气污染不很严重情况下，表现出生长受抑并受不同程度危害。耐污种无所谓，甚至有的还时逢盛世，欣欣向荣。在生存斗争中，因环境变化使植物群落中各物种种类、数量发生不同程度变化，人们往往用分析这种变化来估测当地空气质量变化。

2 水生生物监测

水体污染的生物学监测方法比较多。用水生生物群落变化，种的类型，个体数量，动态特征，受害程度，水生生物体内富集、积累毒物、污染物的程度作为监测手段。主要方法如下：

(1) 污水生物系统法。毒物或污染物排入水源后水质发生一系列变化。通常是源头污染较严重，因河水有自净能力，所以随着距离增加，河水越来越净化。1960年海因斯 Hynes 曾给出如图 6-1 所示的河流中从排入处到下游的生态学模式。由图中不难看到各污染带的变化，在不同污染带中，指示生物显著不同。通常分为多污带， α -中污带， β -中污带和寡污带生物种群。顾名思义，耐污种的数量、种数变化也顺着上面分的顺序而变化；而不耐污种的数量、种数变化却正相反。正是根据这点，在欧洲比较广泛地应用科尔克威茨和莫尔斯松于1909年提出的水体污染评价标准(见表6-1)，称为污水生物系统评价法。

(2) 利用水生群落结构变化来作监测。由表6-1 可以看到污水区与清水区水生群落有很大区别。通常情况下，小

颤藻、摇蚊等在有机物污染较严重，溶解氧较低的水体中照常生活着，成为优势种。有的人认为颤蚓越多说明水体污染越严重，以单位水域中含颤蚓多少来评价水体污染程度。在中度污染区，环绿藻、被甲栅藻、居栉水虱成为优势种。一般由群落优势种的变化可大约推测出水质污染变化。人们以水生群落优势种为起点，依据各种的特性、群落的多样性提出多种多样性指数来定量地反映群落结构和种属、数量组成的生变化，借以判断水质污染程度。并把这种用数学方法反映生

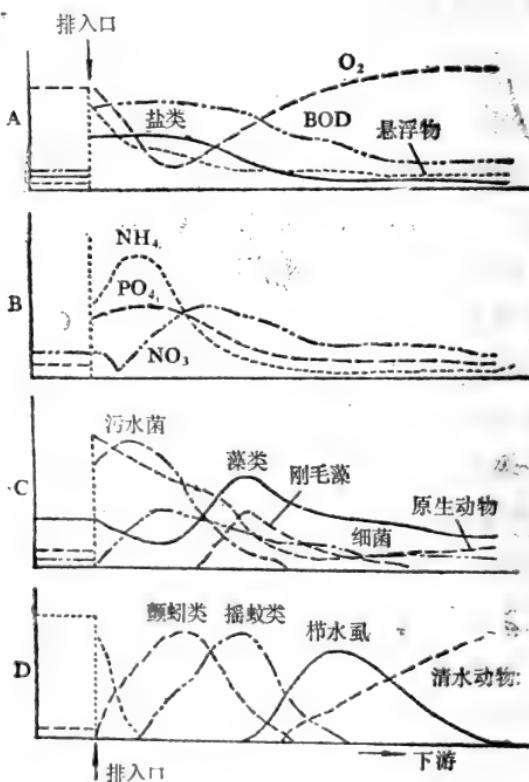


图6-1 污水排进河流后有机污染物浓度变化情况及沿河生态模型变化
(Hynes, 1960)

表 6-1 污水系统生物学、化学特征 (津田, 1964)

项 目	多 污 带	α -中污带	β -中污带	寡 污 带
化学过程	因还原和分解显著而产生腐败现象	水和底泥里出现氧化过程	氧化过程更强烈	因氧化使无机化达到矿化阶段
溶解氧	空气没有或极微量	有些	较多	很多
BOD	很高	高	较低	低
硫化氢的生成	可检出，具有强烈的硫化氢臭味	没有强烈硫化氢臭味	无	无
水中有机物	蛋白质、多肽等高分子物质大量存在	高分子化合物分解产生铵酸	脂肪酸铵化合物大量存在	有机物全分解
底 泥	常有黑色硫化铁存在，呈黑色	硫化铁氧化成氢氧化铁，底泥不呈黑色		大部分氧化
水中细菌	大量存在，每毫升可达100万个以上	细菌较多，每毫升在10万个以上	数量减少，每毫升在10万以下	数量少，每毫升在10个以下
栖息生物的生态学特征	动物都是细菌摄食者且耐受pH强烈变化，有耐嫌气性生物，对硫化氢、氨等有强烈的抗性	摄食细菌动物占优势，肉食性动物增加，对溶氧和pH变化表现出高度适应性，对氨大体上有抗性，对硫化氢较弱	对溶氧和pH变动耐性较差，并且不能长时间耐腐生性毒物	对pH和溶氧变动耐性很弱，特别是对腐败性毒物如硫化氢等耐性很差
植 物	硅藻、绿藻、接合藻及高等植物没有出现	藻类大多出现有兰藻、绿藻、接合藻、硅藻等	出现多种的硅藻、绿藻、接合藻、鼓藻为主分布区	水中藻类少，但藻类居多
动 物	以微型动物为主，原生动物居优势	仍以微型动物占大多数	有多种多样	多种多样
原生动物	有变形虫，纤毛虫，但无太阳虫、双鞭毛虫、吸管虫等出现	仍然没有双鞭毛虫，但逐渐出现太阳虫、吸管虫、太阳虫、吸管虫等	出现太阳虫、吸管虫中耐污性弱的种类，双鞭毛虫出现	鞭毛虫、纤毛虫中有少量出现
后生动物	在此带中轮虫、蠕形动等物、昆虫幼虫出现，水媳、淡水海绵、苔藓动物、小型贝壳，鱼等没有出现	淡水海綿，苔藓，动物没有	淡水海綿、苔藓、水螅、贝类、小型贝壳、两栖类、鱼类均有出现	昆虫幼虫很多，其他各种动物逐渐出现

物种群或群落结构变化的数值称为生物指数。显然，多样性指数一般是种属、数量、分布变化的出数。因为这些指数中主要是以种类比来衡量水体污染差异，所以根据不同种类比，这种指数值不同，而且各人规定的标准值也有差别。例如，有的人用

$$I = \frac{\text{区域中蚓类个体数}}{\text{底栖种类个体数}} \times 100\%$$

来反映水体污染程度，认为 $I \geq 80\%$ ，水体污染严重， $I < 60\%$ ，水质较好，而有的人则用另外标准来衡量。在实用上用得较多的有香农（Shannon）给出的多样性指数

$$d = - \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N} \log \frac{n_i}{N}$$

这里 N 为各种生物总数， n_i 为 i 种个体数， $i = 1, 2, \dots, k$ 。大家多以 $d > 3$ 为寡污带， $d = 1 \sim 3$ 为中污带， $d < 1$ 为多污带。

(3) 利用水生生物个体行为、生理、生化变化作监测。当水体受到污染物和毒物侵蚀时，水中生物个体、行为、生理机能等方面就会发生变化，以这种变化程度为依据来对水体污染程度作出判断。这些工作主要是针对鱼类做测试，分成如下几方面：

1) 生态行为：在污染水体中，某些鱼类浮出水面、表现不安、回避、游泳能力减退以至消失等。2) 生理活动：在污染区中鱼类因耗氧增加，心跳呼吸发生变化，以此来估测水体污染程度。3) 生理、生化方面：软体动物如牡蛎等受铜污染较重时，体色改变。鲤鱼、白鲢等因生活在受有机磷农药污染的水域中，胆碱酶活力发生变化等。

(4) 检测水生生物体内毒物积累量作监测指标。我们已指

出，许多水生生物体都具有富集、积累作用。水生生物体对不易降解的重金属、放射性物质、有机氯农药等有很强的富集性。某些水体虽污染不严重，但也能利用水生生物的富集特性而检测出水质污染物。如用鱼体含汞量变化来监测水质污染状态，利用软体动物易于富集重金属、放射性物质来监测水体污染变化。

(5) 毒性试验检测法。这一方法主要是利用水生生物急性、亚急性、慢性中毒试验来评价废水的毒性和提出水质安全浓度，评价水中毒物、污染物的危害性。应用该法时多采取直接接触致毒手段。把试验用的水生动物如鱼类，放进配好的各种浓度的溶液中或收集来的废水中，定时观察生物的各种反映。如果短时间就出现各种危害生物的中毒症状即是急性中毒；有的隔相当长时间甚至是在若干代子代身上反映出中毒现象则称慢性中毒；处于上述两者之间则称亚急性中毒。依这种检测方法可以定出废水排放的危害性和确定废水净化到何种程度才能排放到环境的水体中。

最后指出，由于水生生物种类、数量分布，个体行为、生理生化特征并不单纯依赖于水质污染程度，还依赖于环境中气候、地理、水深、流速等物化环境条件。在用生物学作监测时，应密切注意环境条件的差异性。当然在大气污染监测、土壤污染监测中均存在此类问题，但水体污染监测中尤应重视环境条件变化。

3 土壤生物监测

有关土壤污染生物监测的国内外文献均较少见，有人利用动、植物变异性能的特征和耐性作用来作土壤的生物监测。如，根据土壤中生长的植物形态变异作监测。在铜、钼污染

严重的土壤中生长的点瓣罂粟，花瓣上可出现黑色条纹；在硼污染严重地区的驼绒蒿变矮小或畸形。在放射性污染的土壤中生长的某些花具有很大的绿叶，却短缺花瓣或雄蕊。不过这种监测多只能说明土壤中污染程度，它也可能是来自水质污染引起，并且这类变异是否为某些毒物所单独具有也不十分清楚。曾有人尝试用与水体监测中应用过的多样性指数判断土壤污染程度，试图把水体中若干种监测方法推而广之，但至今未见满意的报导。由于土壤污染与大气污染，水体污染有某种相关性，毒物、污染物需靠空气、水体才能扩散到土壤中与进入生物体内，因而土壤生物监测更具有复杂性，对土壤污染，人们更多的是应用分析手段来监测。

(三) 废水的生物学处理

许多生产、生活中的有毒物质、污染物是由水进入环境中，因而对生物圈、人类产生影响。这类水中有相当部分乃是废弃水，称为废水。水对于地球上所有生物的重要性在前已述。随着物质生活的提高，废水排放量和水的需求量越来越大。可以想象，不久的将来，不仅是现在某些地区而是相当广阔地区水的问题将成为物质生活提高的限制因素。使废水重新得以利用不但是因淡水水源有限而需研究，它也将是治理环境污染的主要问题之一。废水处理方法有物理、化学和生物方法。带有放射性的废水偏重于用物理、化学方法处理。如悬浮、过滤、石灰—苏打软化法、离子交换法、蒸馏法等。而大量带有毒物、污染物废水不仅仅是靠物理、化学方法处理，就目前趋势看，更多的是采取物理、化学、生物方法混合处理。而生物方法在其中占主导地位。本节主要

介绍如何用生物学方法治理废水。

废水处理过程通常分三级进行。对含有大量有机物的废水，一般先做第一级预处理，包括有沉淀、过滤、筛选、蒸发、浓缩、燃烧、浮选、吹脱等物理法。用这种方法能去除生化需氧量（BOD）30%左右。此外在第一级处理中还用氧化、中和、离子交换、电解、化学凝聚等物理化学方法。不过后者费用较高，而且去除BOD效率并不理想，所以不那么受欢迎。但对于某些废水，如重金属含量较多的废水就只能用上述一些方法。第二级多采用生物方法处理。第三级则是采用物理化学方法对废水进一步净化，使水质提高到能重复使用的程度。根据废水污染程度和最后处理废水的水质要求，上述三级处理中有的废水可能只进行二级甚至一级处理。依据一些先进国家统计，废水处理中必经生物处理的废水占废水处理的绝大部分。下面简述生物方法处理废水。

废水生物处理法基本原理：生物在生命活动及与环境进行物质能量交换的过程中分解、吸收，转化废水中的污染物、毒物，使废水得到净化。由于各类生物生长繁殖均需一定环境条件，如酸碱度、温度、营养物、氧气含量等，这样必需对废水进行预处理，使它能达到生物净化废水处理的较优条件。在废水生物净化过程中起主要作用的生物为微生物、藻类、原生动物及某些高等植物。生物处理过程有活性污泥法，生物渗透、过滤法，生物转盘、固定池、曝气池、厌氧消化池，土地处理法等。这中间微生物起的作用最大，用得最多。我们先从它谈起。

不少微生物种被用来处理废水中有机物。因为微生物中各种酶的作用使有机物中碳水化合物分解成可溶性糖；蛋白质分解成各类氨基酸；不溶解的脂肪水解为脂肪酸，然后再

进行脱氢，传递氢、受氢的氧化磷酸化反应。人们把在微生物作用下受氢体为氧的反应叫做好氧反应，把受氢体不是氧的反应叫做厌氧反应。有关这类反应可用图 6-2 表示出。人们

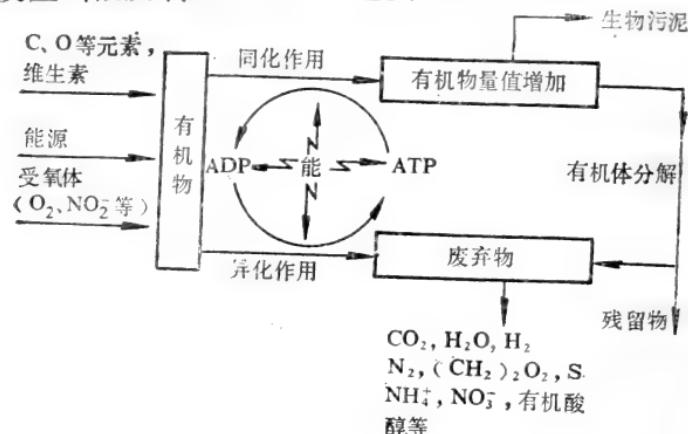


图 6-2 废水处理大致生化过程

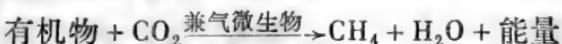
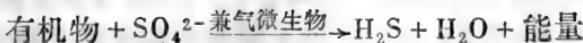
把废水中能被细菌分解氧化的有机物含量用生化需氧量表示 (BOD)，单位为毫升/升，表示生物氧化一升废水中有机物所需的氧数量。如用化学方法处理，则称为化学需氧量 (COD)，单位为毫升/升，表示化学氧化一升污水中有机物时氧的需求量。人们把微生物分为好气、厌气、兼性厌气微生物。好气微生物指在有氧的环境下才能生存的微生物，它的反应式为：

有机物 + O₂ $\xrightarrow{\text{好气微生物}}$ 中间物 + CO₂ + H₂O + 能量
厌气微生物正相反，仅在无氧的环境中才能生存，反应式：

有机物 $\xrightarrow{\text{厌气微生物}}$ 中间物 + CO₂ + H₂O + 能量

或是：有机酸中间物 $\xrightarrow{\text{厌气微生物}}$ CH₄ + CO₂ + 能量
而兼性厌气微生物反应式有：

有机物 + NO₃⁻ $\xrightarrow{\text{兼气微生物}}$ N₂ + H₂O + 能量



此外还有一种仅在少量氧气存在下才生长的微好气微生物。在微生物分类上。人们还依不同微生物在不同温度条件生长的最适温度分为嗜冷微生物(生长适宜温度4~10℃),嗜温微生物(生长适宜温度为20~40℃)及嗜热微生物(生长适宜温度为50~55℃)。废水处理中用得最多的是嗜温微生物。通常,大家还按生物处理中用的是厌气或好气微生物而称好气处理法和厌气处理法。前者包括活性污泥法、生物滤池法、稳定塘和污水灌溉。后者有污泥消化池法,此外还有其它植物处理法。

1 好气生物处理法

(1) 活性污泥法。该法早在本世纪初(1913年)即在英国投入使用。现在世界上一些大型污水厂中多采取此法。它的原理是在好气微生物作用下,含有大量有机物的污水中形成生物絮体,吸附沉淀有机物,生物在其中把有机物氧化分解从而达到废水净化目的,流程如图6-3,废水进入预处理池,把毒物、污染物先进行预处理,然后进入调整池,同

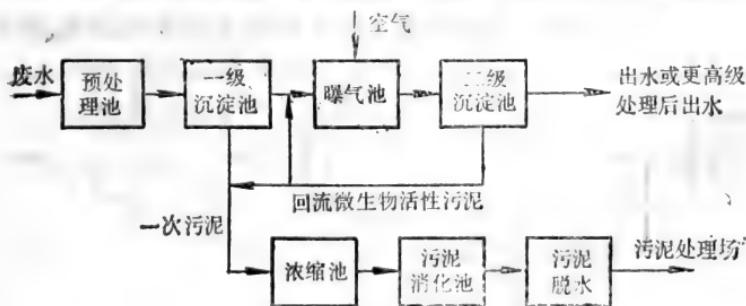


图6-3 污水处理流程图

时往废水中输送空气、养料，调整温度、pH值到合适值（一般BOD:N:P = 100:5:1），再进入曝气池输送进大量空气，为好气微生物生长创造最佳生长、繁殖、发育条件，构成生物絮体，尽快把水中毒物、有机污染物或其它污染物吸附、沉淀或分解为H₂O、NH₃、CO₂和盐类（硫酸盐、磷酸盐等），达到净化水体的目的。由图中可知，迅速凝聚的微生物形成活性污泥沉淀，这里有的再回流曝气池做为活性污泥再利用。经过沉淀池的水直接排放或重新利用，有的则经第三级处理后再做排放或重用。

上述处理过程中，褐色絮状体里（称活性污泥）有许多原生动物如变形虫、鞭毛虫等，也起净化作用，它们可直接吞食有机物。小口钟虫等既能食细菌又能使BOD的去除率提高。纤毛虫等则对凝聚起了加速作用。有人认为纤毛虫所起的凝聚作用较细菌更大。据研究，纤毛虫起凝聚作用的机理是因为纤毛虫分泌两种物质：多糖碳水化合物和阿拉伯糖、葡萄糖，它们在污水中吸附悬浮的颗粒，使颗粒表面的电荷得到改变而集聚成絮状物。纤毛虫在这过程中还分泌糖酐，使絮状物凝结。人们在实践中发现，出水较清时，絮状物上出现的纤毛虫就多，反之较浑浊。如果没有出现纤毛虫，出水就非常浑浊。并且原生动物中相当一类是靠细菌为生，像许多纤毛虫就是如此。据测定，当无纤毛虫时出水的细菌含

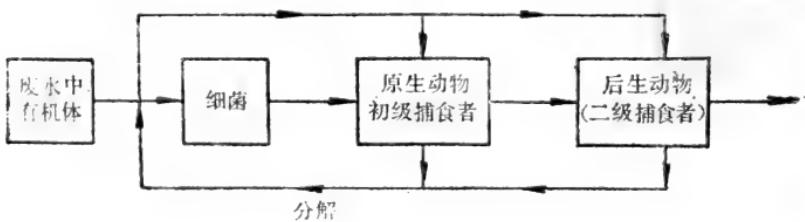


图6-4 活性污泥中的食物链

量高达100~160百万个/毫升，而有纤毛虫存在时可降到1~8百万个/毫升。从微生物生态学方面考虑，活性污泥中能量与食物链关系如图6-4所示。废水处理中原生动物出现较少，一般需看废水处理情况，有时有轮虫出现。应当注意，由于细菌在废水治理中有特殊作用，所以并非原生动物多吃细菌、多繁殖原生动物就好，而是适可而止，达到动态平衡为好。这是因为一方面原生动物大量吞噬细菌，从而加速了细菌繁殖，因而刺激了细菌自废水中提取有机物速度；但物极必反，大量的原生动物出现却使细菌量值降低太大，使去污效果降低。在某种程度上，原生动物又可成为指示生物，当它们大量出现时，意味着对活性污泥系统必需做某些必要调整。

(2) 生物滤池法。生物滤池是装有碎石、煤渣等滤池。预处理后的废水自上而下流经滤料，经吸附作用使污水中微生物被阻留在滤料上，在上面形成一层生物膜，它包括有细菌、真菌、藻类和原生动物以及蠕虫、蚯蚓类等其它高等动物。生物膜表面主要有好气菌活动，它的氧气来源一部分是由藻类放氧供给细菌氧化有机物；另一部分是取自空气。原生动物吞噬细菌使生物膜不断获得更新。不少有机颗粒被蠕虫、蚯蚓所吞食，它们的运动也使粘状生物膜得到松动。在生物膜外层有0.1~0.2毫米厚的小生境，在那里形成生态平衡状态。吞食污物中大小有机物功能较高的是靠近滤床表面微生物。当污水从生物膜上流过，有机质、胶体部分被吸附在滤床上，溶解于其中有机物成为细菌新陈代谢的物料。而滤床下层的微生物则饥肠辘辘。过程如图6-5所示。生物滤池系上世纪末英国人率先采用，现在已经有各种类型的改进型。例如塔式生物滤池、生物转盘等。生物滤池废水流

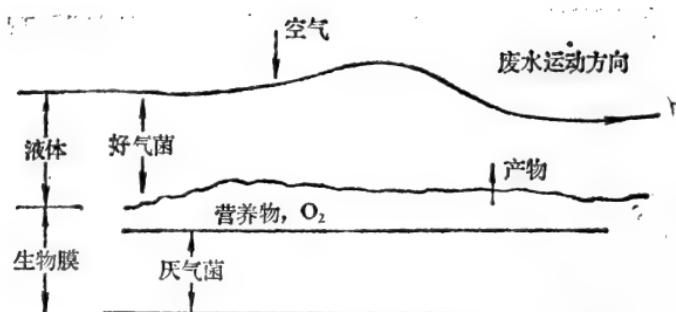


图6-5 生物滤池中的生物过程示意图

动形式有循环和不循环两种。这两种滤池去除溶解性的BOD值不同。

随着技术进步及人口、环境问题的增多。对于经生物滤池处理后的污水往往须再经第三级处理，目的是控制富营养化和废水重新利用。第三级处理中除广泛应用物理化学方法外，现在有的地方也采用生物学方法处理，例如用藻类、水生植物除氮，用细菌同化、硝化和反硝化等。

(3) 稳定塘，又称氧化塘。多数既具有好气细菌作用，又具有厌气细菌的作用，也称兼气稳定塘。用稳定塘处理废水时主要是利用湖塘水体自净能力。因此废水中BOD含量一般较低，在塘中废水停留时间一般为20~120天。塘内生物有菌类、藻类、原生动物、后生动物、高等植物等，组成一生态系。废有机物被细菌、原生动物、腐生动物消耗，在它们的上面是捕食种群如轮虫、甲壳虫等。塘底沉淀则被微生物所消化。藻类光合作用过程利用了细菌代谢过程的营养物，并且为好气细菌提供了氧气。因此稳定塘是兼气系统，塘中关系网如图6-6所示。

(4) 污水灌溉。也称土地灌溉法。这是利用污水灌溉土壤后，土壤中各类微生物使污水中有机物得以分解，而废

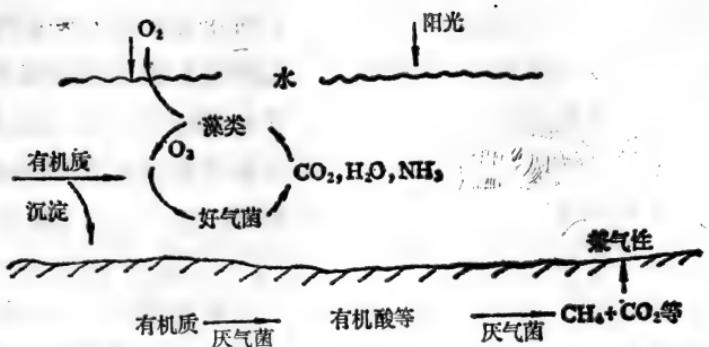


图6-6 兼气稳定塘工作示意图

水中其它毒物也得到降解，转化成为植物的有用养分。它还利用土壤中无机、有机胶体及其复合体对废水中毒物起络合、沉淀和吸收的作用，有的在其中起离子交换作用。在污灌中植物还吸收、分解、转化了许多有机物、毒物。土壤结构和植物根系对废水中毒物、污染物也起了阻滞作用。污水灌溉一方面起了净化污水作用。当毒物、含污量低于一定标准时，用污水灌溉还有明显的增产效益。例如实践中测定，污水灌溉可去除水中85~95%的悬浮物、95~98%的细菌和90~95%的BOD、COD。尤其是它可去除98%的磷、85%的氮。这些磷、氮作为植物营养元素被吸收代谢。在一般污水处理厂中，想去除导致水体富营养化的主要有害物氮、磷的一半，其成本需提高两倍，若想全除去氮、磷，成本高到几乎不敢问津，因此污水灌溉是解决河流、湖泊富营养化的重要手段。据研究，一般经二级处理后，污水含磷4~9 ppm，氮15~35 ppm（一半是氨态氮），钾10~20 ppm（植物能利用其中液态氮、磷30~50%），这些成分均是植物的好养料。污灌的田地与清水灌溉的田地对照有明显的增产效益。美国试验得出某些污水灌溉大麦、玉米等可分别增产达249~263%和220%。

有的地方经十多年污灌试验后并未对土壤产生任何不利影响。国内近几年来试验表明，用处理过的低浓度的酚、氰废水对许多植物均有增产效益，并有明显去污作用，如含酚废水污灌后过3~5天后在土壤各层中很难检测到酚类。污水进入稻田2~4天后，水中溶解氧由2.077ppm提高到6.64ppm，高者超过3倍，BOD由18.7ppm降到3~4.02ppm。污水在稻田5~7天，BOD一般降低72~79%，细菌总数降低了98%。污水进藕塘5~7天后，氨氮去除88%，细菌去除99%，BOD去除92.5%。

污灌中也常带来许多副作用。有的污灌后田地变酸性或碱性增加，有的毒物通过食物链转移到人、畜身上，所以有的国家硬性规定某些污灌区作物只能供工业用。为不造成更大污染，污灌时污水多经处理后才排放。污灌效果好坏需看废水净化后的水质量、作物品种、耕作方法及其气候、环境因子诸条件。需因地制宜而行。尤其需指出，对于严重污染却未经处理的污水一定要严禁灌溉，超过一定指标的污水或是不易降解而易于造成二次污染的含重金属和较稳定化合物的污水应禁止灌溉。如果硬性灌溉，轻者只是土壤肥力下降，酸、碱度提高，对作物收获有所影响；重者可造成土地荒芜、颗粒无收，并严重地造成二次污染。从食物链上危害人、畜，尤其是重金属含量较高的废水。痛痛病的病因之一是人食了污灌后含镉值偏高的谷物所致。另方面，超过土壤降解能力的污灌反而破坏了田地中微生物区系与微生物分解转化机能，从而造成恶性循环，使污灌失败。所以污水灌溉量值应当有所控制。特定的微生物对特定有机物忍受程度均有一极限，例如酚细菌对污水中含酚量的耐值限为0.05%。表6-2是抚顺灌区含酚污水灌溉水稻后，土壤中某些微生物区系

与污水灌溉量值关系变化表。细菌数为每克土壤所含量值。

污水灌溉中微生物起了重要作用，这些微生物中主要是好气细菌，所以它仍属好气生物处理法范围。当然污灌过程中植物、厌气菌类也发生作用。

表 6-2 不同含酚、石油污灌值（以含氮量计算）对土壤微生物影响（以每克土壤含微生物数，年水均值）单位：万

以含氮量计算灌溉定额(硫酸铵斤/亩)	32	54	85	124	161
微生物总数	898	189540	>189540	1297	562
氨化细菌	883	189512	>189512	1270	544
厌氧性细菌	153	111	251	278	126
芽孢细菌	61	62	74	105	88
放线菌	15.7	27.9	34.8	24.8	16.8
真菌	0.37	0.27	0.23	0.19	0.26
酚细菌	181	1248	>1248	170	83
纤维素分解菌	7.4	8.7	11.3	10.1	9.4
硝化菌	0.9	0.53	0.05	0.03	0.15
硫化菌	2.8	7.3	37.9	22.1	13.2
反硝化菌 NH ₃	0.018	0.036	0.037	0.015	0.020
NO ₂	1.65	7.45	40.31	37.8	5.9
反硫化菌	0.6	1.7	1.2	1.4	2.6

2 厌气生物处理法

当工业废水中BOD很高时，用好气处理法处理废水往往失效，并且困难较大。这时多采用厌气处理法。沼气是厌气处理法产物。厌气处理法的废水一般 BOD 浓度应达 5000~10⁴毫克/升。废水中主要成分应是蛋白质和脂肪而非糖类。处理的废水一般应能做到高温、碱度适中、无毒性并具有丰富的营养素。屠宰场废水就具有这一特性。厌气菌分解有机物

能力很强，并和温度因子关系密切。据测定，对某些嗜热菌适宜的高温(50~58℃)较中温(37~38℃)的厌气菌处理有机物能力大2.5倍。厌气法处理机理的第一步是有机物水解，在微生物作用下变成有机酸(如醋酸等)，第二步由有机酸变成二氧化碳、甲烷，这一过程由甲烷细菌完成。厌气处理发酵产物如图6-7所示。厌气处理法中有用厌气滤池或厌气湖处理高BOD废水。厌气滤池上面有盖，废水由底部流入，顶上冒出。池中填有滤料。废水必须在滤池中停留一定时间才

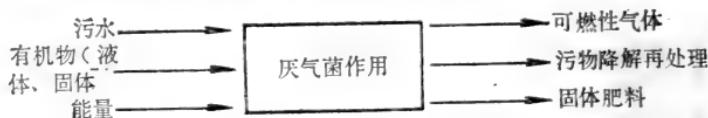


图6-7 厌气处理大致过程

能达到处理目的，污水淹没填料。现在各种厌氧处理法越来越多。但是城市、农村的废水、污泥消化处理中值得重视且较为广泛推广的是厌气消化池。废物通过厌气消化池变废为宝，使许多能源缺少地区取得一定能源，我国不少农户就用此法做为日常生活能源来源之一。厌气处理法中较为重要方面是污泥消化、堆肥。它的处理效果与污泥中固体去除程度、污泥密度、特性等相关。一般待处理的生污泥中固体浓度在1~8%之间。

由于在废水厌气处理过程中各种菌类生长、发育、繁殖等差别较大，所以使用厌气处理废水、污泥过程中对环境温度、酸碱度、氮磷养料与BOD比、毒物含量和厌氧环境条件要求很严，稍一处理不当就失效。虽然厌气处理后一般BOD去除率达85%以上，处理后的污水、污泥也是好肥料，而且因温度较高、缺氧等因素能杀死部分害虫、细菌。但处理后的废水COD、BOD还较高，需再处理后才能排放。因厌气菌

生长繁殖慢，所以处理过程相对时间比较长，加上环境条件要求较严，这些均被认为是厌气处理中的一些缺点。

3 污水的藻类、水生植物、森林处理法

除上述两种处理方法外，还有相当一类废水可用藻类、森林等植物处理。某些重金属、毒物含量较高时，微生物处理法常常失败，转而采用藻类、森林处理污水。

近年来，在废水处理中藻类应用越来越广。其方法是在污水池、湖、塘中培养藻类，让藻类吸收氮、磷或其它重金属，然后再收获藻类达到去除废水中污染物，毒物的目的。据报导腈纶废水中氨氮可用变鞘席藻等处理。当连续进水时去除氨氮值达 $1.5\sim1.6$ 毫克/升·小时。有报导说利用丝状绿藻进行四级串联处理含汞值为4毫克/升污水时，停留时间为24小时，去除率可达94%。藻类去除汞主要是利用表面的吸附和细胞体内积累。还有人用藻类处理印染污水等。轮藻对砷、汞有很大的吸收积累能力，可用来净化含砷、镉、汞等污水。对含有较稳定化合物且能被藻类吸收的废水均可试用藻类净化。

在污水净化中，人们发现某些水生植物对清除含酚、氰污水有特殊功能。如水葱、灯心草、芦苇等。水葱能降低污水中BOD值，只要适时收获，它吸收的酚类等不重返水体和沉淀于底泥中。水葱对酸碱忍性范围大。在50小时内，温度 $18\sim20^{\circ}\text{C}$ 时，水葱能把5升水中10ppm的酚吸收。据报导用水葱净化食品厂废水，只两天时间，水中COD可降低70~80%，溶解氧含量提高到10倍。眼子菜、芦苇、凤眼莲等植物可去除石油加工产生的污染物95%以上。有人利用浮萍吸收污水中镉等重金属。

近几年，用林地植被净化污水也受到人们注意。据研究，在一定密度的林地中，污水径流30~40米宽，氨氮可减少33~50%。污水径流正常密度的有林山地再流入河谷中，是流经无林山坡再流入河谷水中溶解物的39%。污水流经三十年生50米宽扬桦混合人造林地，每升水中细菌量减少90%。这都说明森林地也可处理污水。

上面我们介绍了含有机物、化合物的废水处理。对于含重金属污水生物治理也能起些作用，但效果不太明显。近年有人研究用吃汞微生物清除水中甲基汞，去除率可达90%。还有人用微生物清除水面石油污染。也有人尝试把遗传工程技术引进废水净化工程。尽快使污水不再污染环境且能有效地为人类服务，是环境科学工作者的重大任务之一。

(四) 污泥和土壤污染的生物治理

在废水处理中，除直接对废水用各种方法净化外，还必须对沉淀下的残渣（俗称污泥）做生化处理。污泥由于来源不同而分门别类，象来自预处理过程的沉淀，称生污泥；来自消化池的称活性污泥或消化污泥，此外还有用物理、化学方法处理后所得到的种种污泥。

传统上对污泥的处理多是运用物理、化学方法，例如污泥浓缩、脱水、干化、燃烧。然而所有这些处理方法均存在二次污染问题。特别是燃烧，进一步增加了环境中空气污染。对于主要成分为有机物的污泥，一个有前途的处置方法是与城市垃圾堆放在一起成为垃圾堆肥。这种堆肥里含有水分40~70%。在堆肥里发生的反应是好气细菌参预下的生化反应。所以它是生物处理过程。这种污泥最终产物是腐殖

质，可做为植物的肥料。堆肥内发生的生化过程大致如下：堆肥先保持较高温度（45~60℃），在一定时间内，使嗜热菌活跃并氧化、分解各类有机物，这时产生热量，二氧化碳、水和腐殖质。伴随这一过程往往还产生有废气分解，但终被好气菌消化、还原。参与分解有机质还有兼气菌和真菌。由于城市堆肥中往往缺乏氮、磷，而这一过程恰需这些，所以在缺乏氮、磷的堆肥中还要加入适量氮、磷。最好使污泥、废物堆肥中C:N = 20:1，N:P = 100:1。为了使堆肥中好气菌能得到充足的氧，人们还向污泥与城市垃圾的混合物中加进空气，或是用露天堆肥方式，堆成小堆，几天一翻，经过一段时间堆积变废为宝，成为改良土壤、供给作物的有效养料。最终产物作肥料的堆肥应使其中的污染物不超过环境排放标准才可使用。另一种污泥处理方式是上节所说厌气处理，把污泥适当稀释成流态污泥进行厌氧发酵，产物有沼气、水和肥料，也是废物利用。

现代工业的发展，废水灌溉和各类毒物、污染物的飘落、施放以及农药的施用，使许多土地受到不同程度的污染。有的土地已成不毛之地，最耐污的品系都难以生存。因此人们除应积极采取措施管好毒源、污染源外，还应对许多被污染了的土地或是正在受害的土地采取有效的改造净化手段，这任务越来越迫切了。

土壤污染是指现代人类生产、生活中的废物在土壤中被加速积累，使土壤结构功能发生变化。土壤污染类型有：

1. 化学性污染。（1）有机废物和有机农药、化肥使土地受到污染。（2）各类重金属、类金属及其盐类物质对土壤的污染。（3）受各类污泥、矿渣的侵蚀。

2. 物理性污染。如放射性、热污染。

3. 生物性污染。各类病虫害、菌类污染。

土壤污染中最大量与最经常的污染是化学性污染；其次是生物性污染；最后是物理性污染。这里主要谈化学性污染的治理。各类污染物有直接通过土壤危害各类作物的，也有通过作物这一类从食物链传递给人、畜，使人深受其害。有的毒物，污染物使土质变坏或产生还原性物质从而间接影响作物生产。被污染土壤的改造多是采取物理，化学方法。例如换土、深翻以及施用化学性物质，使它们和化学性污染物起反应，使毒物、污染物降解或降低它们的活性。通过自然的净化，如挥发、稀释、扩散等物理化学过程净化被污染土壤。除此之外，人们也在寻找用生物方法来去除土壤污染。下面是这方面的研究情况：

1. 在土壤改造中，人们首先注意到的是神通广大的微生物。微生物对土壤中有机物，诸如酚、氯、某些有机农药具有降解、转化、生物固定化等作用。如人们在经常用低浓度酚水灌溉的土壤中，土壤的微生物区系发生有明显的变化，吃酚的微生物群落生气勃勃，酚氧化酶活跃，微生物对酚类分解作用使土壤中酚很快得到净化。有人实验用50克新鲜土（含水16.3%）加入25毫升10ppm的酚水，在28℃恒温两天时间即无法检出酚类。杏树、亚麻根际的微生物对土壤中氯化物有很强的净化作用。微生物对有机氯农药可起脱氯作用。可使酰酸类、除草剂水解、还原、络合等从而使土壤污染得到治理。这些微生物在土壤中作用多与好气菌活动过程相类似。

2. 污染土壤的有机物质，毒物可被植物根系吸收后转送到身体各部，进行各类生化反应。如代谢转化或是成为生物体组成部分，或是成为非活性残留物、二氧化碳等。当然

也有的毒物经吸收后毒性，污染性反而加强甚至重返土壤使之受害。

3. 对于受重金属污染严重的土壤，微生物可使某些金属矿物化，使毒性减少，还有些重金属可以被植物吸收积累。由于不同植物对不同金属的吸收积累差别显著，人们针对被污染土地的主要有害金属种植容易吸收，积累该金属的植物，借以降低土壤中该重金属含量而达到去污目的。例如某些蕨类植物对土壤中镉的吸收率达10%，而水稻则仅为0.2%，这样人们通过种植蕨类植物来吸取被镉严重污染的土壤中的镉，使土壤污染较快得到改造。被硒严重污染的土壤，则可栽种紫云英类，它吸收能力可达 $10^3 \sim 10^4$ ppm，并且紫云英地上部分硒积累量大于地下部分，收获地上部分即可相当程度地减轻一些土壤污染。被氮、磷严重污染的土壤，也可用收获形式去除土壤中氮、磷。如有的草每年从土壤中吸收540~670公斤/公顷的氮，大豆则达105~125公斤/公顷。吸收积累了毒物，污染物的植物体，有个如何处理的问题，妥善处理才能不重返土壤。另方面是防止毒物、污染物从食物链上传到人、畜。因而需依污染物种类，污染物在植物体内情况及植物种类而分别采取各自恰当的措施。譬如可种植工业用料，把收获物焚烧等。由于许多植物吸收的重金属主要积累在根部，收获时根部较难回收，所以它较易返回土壤。给用植物方法吸收毒物、污染物以去除土壤污染的方法带来一定局限性。按现有技术水平，除了个别重金属外，根除重金属对土壤污染的根本措施还在于回收重金属排放物和选择重金属弃放物的合适场所，减少对土壤的污染。

4. 受物理性污染的土壤，如放射性污染的土壤，至今尚未找到有效办法。植物吸收放射性的问题同植物吸收某些

重金属问题相类似，还没有找到合适的陆生生物吸收后能妥善处理的办法。

5. 土壤生物污染的防治属于古老的课题。它属于一部分生物对另一部分生物造成危害。土壤中某些病菌可引起油菜、甘蓝、大白菜得根肿病；使棉花、黄瓜得枯萎病；菜豆得根腐病等，这是害虫、细菌、病毒对作物的危害。关于它们的防治可以靠生物、化学或物理措施来进行。土壤同时也传播与人、畜有关的疾病、病原体、细菌、病毒。防治这类土壤污染更多的是靠化学药物或物理方法，也有用生物方法防治。有关生物性的土壤污染生物防治方法在害虫的生物防治一节中介绍。

土壤的生物治理是个吸引人的课题，它也是人类使土地恢复生态平衡的有力措施，正在日益受到人们的注意。这里不仅是受污染的土壤，而且还包括由于人类的无知所造成荒山秃岭和失去生态平衡的地域。

（五）绿色植物在治理某些环境污染中的作用

大家知道，植物在调节小生境气候中，治理水、土污染中起着相当大的作用，不仅如此，绿色植物在治理大气化学性污染、某些物理性污染、生物性污染中均发挥着作用。在环境保护和生态平衡中占有特殊的一席之地，下面分别予以介绍。

1 植物在净化大气中化学性污染的作用

（1）植物对二氧化碳的吸收。

文明的进步，使人类应用能量的量值直线上升。除了少

数核能、地热能、太阳能、风能、水力能的利用外，人类活动大部分的能量来源还是靠煤、汽油及其他物质燃烧中获得的化学能，这样就有大量的二氧化碳往空气中排放。近几年数字表明，大气中二氧化碳含量已达 340 ppm。大气中氧和二氧化碳的比例由绿色植物来调节。据测定，一公顷阔叶林在夏季一天中消耗一吨二氧化碳，释放 0.73 吨氧。一定密度的针叶林释放氧量为 30 吨/公顷·年，农作物为 3~10 吨/公顷·年。所有绿色植物或浮游绿色植物、藻类均在起着吸取大气中二氧化碳，放出氧的机能。陆生植物，浮游植物每年约吸收固定二氧化碳 600~700 亿吨。大气中的氧除少部分来源于紫外线分群大气外层的水气而分离出氧外，几乎全部是光合作用过程光能分解水而释放出来的。在夜里，多数绿色植物虽然耗氧，但与白天光合作用时的放氧相比微不足道。因此保护和发展绿色植物，尤其是森林，是防治空气中过量二氧化碳污染、维持生态平衡的主要手段。

（2）植物吸收大气中许多有毒的气体，起了净化大气作用。

二氧化硫、二氧化氯、氟化氢、氯气、酮、乙烯和苯等无机、有机气体以及汞、铅等重金属蒸气，还有光化学烟雾均可被植物吸收。据日本资料，1 公斤柳杉林叶在生长季节中每日可吸收 3 克二氧化硫。据报导，某氟肥厂离污染源百米处女贞叶中含硫量竟占叶片干物质的 2% 左右。有人试验，二氧化硫气体通过高、宽分别为 15 米的林带后，浓度可降低 25~75%。在较高浓度的实验熏气条件下，女贞叶在 2 小时内每平方米可吸收氯气 121.2 毫克。根据抽样估算，离污染源 400~500 米处，每公顷兰桉阔叶林叶片干重 2.5 吨，每年可吸收几十公斤氯气。植物对氟化物吸收能力也异常之高，有

的植物富集氟化物能力竟达几万倍。有人在磷肥厂附近采集到桑树林树叶中含氟量为无污染区的 512 倍。在含氟浓度 5.5 微克/米³ 蒸气中，蕃茄叶子可吸收 3000 微克/公斤的氟。氟化氢在通过 40 米宽刺槐林带后，浓度比通过同距离空旷地可降低近 50%。植物也吸收重金属蒸气，如一般作物茎叶可吸收铅 60 ppm；醛、酮、酚、醚等有机蒸气可被加拿大杨，桂香柳等吸收。不管哪种植物吸收有毒气体，吸收的量值都依植物物种种类、大小、年龄、生长状况、季节、气候和毒物种类、特性、浓度及其环境条件而有所不同。由于植物吸收了大气中有毒物，从而在不同程度上减轻了大气污染程度，净化了空气。

2 植物对大气中物理性污染防治作用

(1) 植物吸滞灰尘，降低大气中含尘量

大气除受有毒气体污染外，还含有大量粉尘。有火山爆发、大风暴、地震等带来的天然粉尘；有人类的各种工业活动，生活活动排入大气中的大量烟尘。估计地球上每年由人为排放引起的降尘量约为 0.37×10^6 吨，天然产生的约为 4.41×10^6 吨。天然的远较人为的严重。然而在许多城市可高达 1000 吨/(公里)² · 年，人为的远较天然的严重得多。在这些粉尘中有大量的无机物和有机物，主要有燃料燃烧的碳粒、烟灰及碳化物。生产、采矿工程产生的汞、铅、铍、镉、镍等金属粉尘，硅、铝、钙、钠、钾等氧化物，盐类，有机醇、酮、脂等，它们有可溶与不可溶之分。天然的一般不溶于水。各类粉尘充塞于地球的各角落。植物因具有叶面粗糙、多皱，有绒毛或能分泌液体、油脂使它们具有吸附、粘着阻挡灰尘的功能。特别是雨天，稠密的树叶对混合于水

中的粉尘有明显的过滤作用。

植物吸尘、减尘的效果与物种种类、种植面积、密度、植物的叶型、状态均有关。一般认为，高大、树叶茂密的树木较矮小、枝叶稀少的树木吸尘效果高得多。而生长季节树木无疑地比落叶季节树木吸尘、滞尘量强得多。因叶型、着生角度、叶面粗糙程度大小等关系，不同树叶滞尘量差别显著。榆树叶滞尘量为 $12.27\text{克}/\text{米}^3$ ，绣球为 $0.63\text{克}/\text{米}^3$ 。洋槐阻尘率达 17.58% ，冷杉达 2.94% 。植物阻尘、吸尘主要靠叶子，叶面积大小直接与吸尘值相关，而且吸尘值也与树种类型关系密切。一公顷的山毛榉林过滤灰尘量为同面积的云杉林的两倍多，每平方米杨树叶吸尘量仅是同面积的榆树叶吸尘量的七分之一。由于树木有显著吸尘、阻尘的功能，尤其是高大、茂密树木。所以广种树木不但绿化、美化城市环境，而且可显著降低空气中含尘量。据测定，绿化好的城市降尘量只及没有绿化好城市降尘量的 $1/8\sim 1/9$ 。某城区曾测定，在绿化较好的街道树下距地1.5米处大气含尘量较未绿化的对照区含尘量低 56.7% 。一般植物也有明显吸尘、阻尘能力，绿草地带较无草地带阻挡尘土飞扬的能力强大得多是众所周知的，有草足球场较无草地灰尘量可减少 $2/3\sim 5/6$ 。某些植物可用来吸收含有铅、锌等粉尘，有人用表面无角质层的苔藓植物做成集尘罐来净化空气中铅粉尘。

（2）植物可以防治噪声污染

在城市，噪声已成为严重的公害。我国噪声允许标准的最高值，体力劳动环境为90分贝（理想值为70分贝），脑力劳动环境为60分贝（理想值40分贝）睡眠时最高值50分贝（理想值为30分贝）。城市中交通繁忙的地区噪声通常在 $80\sim$

84分贝以上，靠近强噪声源的居民区受害尤深。根治噪声的方法是对噪声源加强管理，降低机械噪声，对城市居民区做合理布局和利用各种吸音，消声建材和材料使噪声传播很快减弱。由于植物叶片、树枝具有吸收声能与减低声音振动的特性，成片的林带可以相当程度地降低噪音量。有人试验，3公斤硝基甲苯炸药爆炸，在林区只能传播400米，而在空旷地带则是它的10倍，可传到4000米以外。图6-8表示树木降低噪

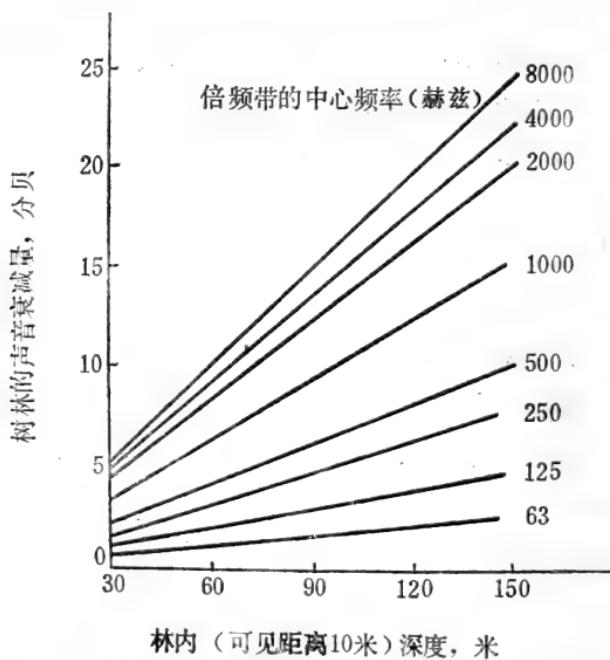


图6-8 树林内(可见距离10米)不同频率声音衰减量值变化

音量值。试验表明，单株或稀疏的植物对声波的吸收和反射很少、但当形成郁闭的树林或绿篱时，则可有效地吸收、反波。实验证明，时郁闭的树林或绿篱时，则可有效地吸收、声障板，声音衰减基本符合障板隔声规律，对于低频声源（如1000赫兹以下）由于自身传播过程声强的衰减及树木作

用可使声音传播有较大程度降低。实地测得，对由较好的绿篱、乔灌木和草皮组成的结构，每10米可减噪3.5~5分贝。因此，为防止噪声传播，在交通线两旁应当稠密地种植乔、灌木搭配的林木、草地，多种宽叶树，林带应宽，防声林应尽量靠近声源。城市应有6~15米宽，郊区应有10~15米宽林带，林带高度应在10米以上。噪声传播减弱程度与声源频率、树种、树叶、枝叉的密度有关。

（3）植物阻隔、吸收、过滤放射性物质

放射性物质对环境危害自第二次世界大战中广岛爆炸一颗原子弹后已为世人所熟知。对于放射源的处置人们是很关心的。而放射性物质扩散范围、速度与地形、地物环境条件直接相关。地物中的一类——植物，它也起着阻碍放射性物质传播、辐射功能，特别是对放射线尘埃起着明显的吸收、过滤作用。人们测定过，在每平方米含有1毫居里（1居里 = 3.7×10^{10} 贝可〔勒贝〕）的放射性¹³¹I，在中等风速下，叶片吸收能力为1居里放射性¹³¹I/每公斤叶片·小时，其中1/3的¹³¹I进入叶组织内，2/3的¹³¹I被阻滞在叶面上。放射性物质被叶子阻滞吸收率与叶面积大小紧密相关。迎风的叶面阻滞吸收放射物质能力较背风面叶面高得多，常绿阔叶树较针叶林净化能力强多了。有许多植物，在吸收较高剂量的辐射下仍生长良好。栎树在γ射线辐射情况下，吸收1500拉德（1拉德 = 10^{-2} 戈〔瑞〕）剂量的中子却生长照常。

（4）植物对生物污染的防治

空气中含有大量的细菌，如各种杆菌、球菌、霉菌、放线菌、酵母菌等都是借助于空气中灰尘、雾粒等飘浮物传播。由于植物有阻尘、吸尘作用，因而也阻挡与吸收了细菌，从而减少了空气中细菌传播和含量。许多植物本身以及它们

分泌的气体或液体也能抑制、杀死细菌。大蒜、洋葱能分泌杀菌素、柠檬、桦木、地榆根也具有杀菌能力。这是草木可入药的道理。有的植物可使比较大型动物和人类丧生，所谓毒草是说明了某些植物杀死生物的功能。因植物具有杀菌、阻止细菌传播功能，在同样城市的客流条件下，绿化较好的街道比绿化差或没有绿化的街道细菌含量少1~2倍。曾有人做过测试：百货大楼细菌数为400万个/米³，林荫道为58万个/米³，管理得较好，植物繁茂的公园内有1000个/米³，在林区仅有55个/米³。这里，人为活动的差别使细菌的量值有所不同，但无疑地，植物杀菌作用是起了很大作用。我们由不同中草药的不同功用很快可想象到不同植物具有不同的杀菌、阻止细菌传播的效应。通常认为茉莉、黑胡桃、柏树、柳杉、樟、松、柏等能够分泌挥发杀菌或抑菌物质，在主要分布该物种的林区较其他林种林区细菌含量更低。表6-3是不同林地、草地的减菌作用。

表 6-3 不同林地和草地的减菌作用

种类	每立方米空气含菌数
黑松林	589
细叶结缕草地	688
日本花柏林	747
樟树林	1218
杂木林	1965

(六) 防治农药污染的动植物生物保护法

用化学方法防治人、畜、病害、杀菌、杀虫早已有之，

但用化学农药防治植物病虫害，根除杂草主要是在第二次世界大战后采用。当时人们认为人类有了根治作物病虫害的有效方法，防治害虫可以一劳永逸。殊不知，一般事物总是具有两面性。在人类广泛利用药物杀死各类病虫害和杂草的同时，也使药物污染范围迅速扩大和严重化。环境的药物污染对人和生物影响可直接或间接地通过食物链或其它途径产生危害。农药不仅杀死害虫，同时也杀死益虫，稍不小心就能引起人畜中毒。对于稳定性较强的有机氯农药及重金属化合物农药，毒性可在土壤中长期残留，在植物果实上积累，食此收获物的人、畜深受其害。农药的失效性还表现在长期的施药过程中，一些害虫、杂草、细菌、病毒的抗药性得到不同程度的增强，使原有农药即使加到可观的药物量其作用也不大。当害虫、杂草失去控制时，则比原有十倍疯狂，百倍凶狠地猖獗起来。于是，人们又开动脑筋寻找既经济有效、又不污染环境的治虫、治菌的方法。很自然，人们也在历史中曾经起过作用的一些方法中寻找。人们在用化学药品防治害虫之前，用生物治虫诸方法中有失败的经验，但也有成功的经验。在总结这些经验中，发现以生物方法来保护动植物方法乃是行之有效，又不污染环境的方法之一。有时与其它防治方法结合其效果更佳，这方面的研究越来越得到人们的注意，研究范围越来越广。

动植物的生物保护法的经典例子是美国加利福尼亚州由澳洲引进寄生蝇和捕食性瓢虫来防治吹棉蚧以及为消灭澳洲成灾的仙人掌从南美洲引进吃仙人掌的蛾。现在已不仅限制在以虫治虫、防杂草，还发展到用遗传工程来防治动植物病虫害。

上世纪末，吹棉蚧由澳洲带进美洲并在一些地区传种接

代，尤其在当时还没有它的天敌的加利福尼亚州蔓延开来，受害严重的是柑桔业。后来阿伯特 (Albert Koebele) 在澳洲原产地找到吹棉蚧的天敌澳洲瓢虫和隐毛蝇，把它们引种到吹棉蚧成灾之地释放而获得成功。尤其是澳洲瓢虫，1889年在加利福尼亚州严重污染区释放500多只瓢虫，很快就使吹棉蚧得到控制，使吹棉蚧在该地成灾成为历史中的一页。现在吹棉蚧严重发生区仅限于那些使用农药杀死柑桔害虫，同时也杀死澳洲瓢虫的地方，在那里吹棉蚧得以死灰复燃。在我国自五十年代以来也引进澳洲瓢虫防治吹棉蚧，至六十年代澳洲瓢虫在广东、广西、四川、福建定居下来，这些地方吹棉蚧也基本消灭。生物防治仙人掌，则是因为本世纪初，澳洲从南美引入霸王树仙人掌，它很快在当地繁殖起来并成灾，使当地植被中霸王树仙人掌成为优势种。后来，人们从南美洲引进吃该植物的蛾子，使这些仙人掌得到控制并不再成为优势种，植被也得到恢复。

以生物来保护生物的关系本质上是生物间相互关系。这种保护方法一般很经济。例如以上所举，用澳洲瓢虫防治吹棉蚧只花费约5000美元，包括观察费用和引进费用。这与费用昂贵，并易于造成抗药性和环境污染的农药防治比较，好处难以比拟。这种以天敌制裁害虫、杂草的模式，首先是寻找害虫、杂草的有效天敌，其次应考察、研究该天敌在当地放养后所造成的生物和经济效益(损失与得利)，在确定有益后可引进并创造条件使之定居。七十年代初，已有相当部分出色的生物防治例子，德·巴赫(De Bach)曾列了一张至1969年为止各地引进天敌防治效果的表6-4，由表中可看到，用天敌防治害虫有许多成功的例子，但也有不少是失败的。较为突出的例子有防治加拿大的冬尺蛾，去除加利福尼亚州贯叶金

表 6-4 到1960年世界上通过进口天敌进行生物防治的
害虫种类和取得成功数目和程度(De Bech, 1971)

害虫种类	成功数目与程度				失败的数目
	部分	基本	完全	总数	
223	30	48	42	120	103

丝桃杂草等。至于在失败的例子中有许多原因，有的是气候原因，如我国岭南蚜小蜂在加利福尼亚州可有效地防治当地红蚧，然而在生态环境较加州极端地区（夏季高温、低湿或冬季低湿地带）是失败的，主要原因是因蚜小蜂本身生命不保。另外，害虫对敌害的抗性虽然不及害虫对药物抗药性那么普遍，然而也有不少报导。1911年后从英国引进加拿大姬蜂到曼尼托巴，对叶蜂进行防治，起初非常成功，然而到四十年代发现叶蜂又猖獗。经马尔德鲁（Muldrew）1953年研究指出这是因寄生在叶蜂上的姬蜂幼虫被寄主包裹化而丧命。

利用天敌防治病虫害方法包括有1.利用捕食性天敌如瓢虫、草蛉、螨类、蜘蛛类捕食害虫。2. 利用寄生性天敌防治害虫，如寄生蜂等。3.用脊椎动物如鸟类吃松毛虫；燕子、麻雀吃各种害虫；鸭子捕食叶蝉、稻蝗；蛙类吞食各类害虫。在我国，远在元朝王桢的《农书》上有：“蝻未能飞时，鸭能食之，如置鸭数百于田中，倾刻可尽。”还有鱼类捕食孑孓。国外广泛利用食蚊鱼治蚊。4.微生物类治虫。如用病毒使昆虫大面积致病，1950年加拿大用核内多胚病毒来防治松和云杉的锯齿蜂；用病菌使虫害致病，有用白僵菌、放线菌等治虫害。近些年美国有人利用细菌消灭蚊卵。在我国用白

僵菌防治甘薯象鼻虫、大豆食心虫、松毛虫、玉米螟都获得一定效果。近年来细菌治虫方法在许多国家都有新的突破。

用生物防治病虫害的另一有效方法，是人类千百年来不断寻找培育植物抗性来防治病虫害，和利用不同耕作，栽种方法来防治病虫害，驱赶害虫。选择培育作物抗病虫害品系首先是选择那些尽管受到害虫或病毒、细菌攻击后仍能进行正常生理活动，产量不受影响，或是使作物含有对危害该作物害虫有害无益的成分。使害虫食而无味或致病，或是通过杂交，培养出能抑制危害该作物病菌、害虫的生存、生育、繁殖的品系。我国陕西关中曾经是小麦吸浆虫严重为害区，1952年以前，小麦因此平均减产30%以上，1953年后，推广抗吸浆虫小麦“西农6028”，结果到1955年被害率反不足2%。据统计，连续四年种植该品系的地区，吸浆虫虫口数仅22.5头/米²，而连续不种抗吸浆虫小麦、虫口密度达2088头/米²。又如1860年左右，一种寄生在葡萄根部芽虫从北美传入欧洲，使当时欧洲所有葡萄均遭受其侵害。后来在美国本土找到一种对蚜虫有抗性的葡萄，人们通过将欧洲葡萄嫁接到美国葡萄根茎的方法培养了抗该种蚜虫的葡萄，从而挽救了欧洲葡萄业。近年来苏联有人培育出不怕虫害、病害的向日葵，此外如培育出抗春杆蝇的小麦种等。据报道，比利时一家遗传工程公司宣布，它已对一种烟草的基因进行了改造。使烟草叶子能分泌出杀死害虫的细菌霉素。凡此种种说明，培养植物抗性来防治病虫害已得到广泛的应用。利用不同耕作，不同栽种方法来防治病虫害，驱赶害虫也是行之有效的方法。有的地方高粱、玉米间作，虽然高粱蚜虫大发生年，间作高粱地未打药却比清一色高粱地蚜虫少，增产2/3强。有的利用上下茬种植不同的作物驱除，防治病虫害；有

的利用作物不同布局来防治病虫害。在林区，一般的混交林远比单纯材种害虫虫口量值小得多。此外还可利用作物密植或是疏栽来控制某些病虫害的危害。

近几十年，人们从遗传观点来研究病虫害的防治，如考虑改变病虫害的生殖率、性比、生殖力、发育速度等。人们不仅是从种植制度、农业技术上影响，而且还用放射性照射导致昆虫不育或用化学方法处理使昆虫不育。利用释放不育性害虫，使许多害虫交尾后产不出后代。美国佛罗里达州用此法制服羊旋皮蝇，他们用5000拉德放射量急性照射使之不育，再释放到野生种群中，使子代数目显著减少。还有利用致害虫基因成分变化的手段，使害虫延续后代能力减弱与消失，以及用性激素等方法引诱围歼虫害。

上面我们是分段说明生物的各种病虫害可用某些生物手段防治。实际上，各种情况往往是混合使用更佳。这种混合使用也称综合防治，它常结合化学防治一起进行。总目的是为防治生物病虫害取得对人类最有益效果。这里顺便说明，化学防治病虫害方法在今天有不少还是行之有效的。几十年来，它从病虫害那里夺回不少粮草，增加不少粮食产量。人们现在还在寻找不污染环境，少产生抗性的行之有效办法。还应注意，为防治人畜的各种疾病，人畜并不少用化学药物，使用这些药物同样可产生环境污染问题和病菌、害虫的抗药性问题。因此，应用生物学方法防治病虫害已是大家乐于寻找的方法之一。自然，人、畜自身健康乃是防治疾病最有效手段。其次，利用树皮、草根和其它生物治病正被发扬光大，并为人们所乐于接受。还有的是利用上述植物生物保护法中相类似手段来防治人、畜疾病。例如，危害甚重的疟原虫，由于产生抗药性，正在使特效药——奎宁等失效，疟

蚊大有卷土重来、日益猖狂之势。人们正在研究杜绝疟蚊新方法。其中有效方法之一就是养鱼除蚊和释放不育性蚊子，以便使疟蚊断子绝孙。

七 人类活动对环境的影响、环境 保护和环境改造

(一) 人类活动对环境的影响

现在，人们越来越明了环境污染直接影响生物圈中各类生物的存亡、分布和兴衰。许多环境污染现象乃是人类活动的结果，接着人类又自食其恶果，这个恶果有多大？在没有考虑自然产生的公害情况下，有人用下式表示公害方程：

$$\text{人类对环境的冲击} - \text{环境自净能力} = \text{公害}$$

因此公害很大程度上乃是自然对人类活动的报复。要避免这一恶果自然还需靠人类自己。为此不但要分别分析环境污染因子对生物、人类的危害，还需分析人类活动对生态系统的影响。

从生物圈看，生命与无生命系统乃是生态循环中不可分的两部分。一部分能量、物质循环的增减都将影响另一部分能量、物质循环的相应变化，但最终是以人类得益与否为定论。下面分析生态系统中两大循环即能量循环与物质循环是怎样受人类活动和环境污染的影响。

1 人类活动对物质循环的影响

(1) 人类活动对生命物质的影响

据考证，约35亿年前，从地球上生物出现起，不断地有新的物种产生，同时也不断地有物种灭绝。在自然条件

下，这种灭绝速度很慢。在远古时，无脊椎动物约三千年形成一个新种，同时约三千年左右灭绝一个物种。有的人认为，在地质时代哺乳动物约八千年灭绝一种，鸟类三百年或五十年灭绝一种。而现在，在人类干预下，一方面有不少新种用人工杂交、遗传基因改变等方法获得，但同时也以惊人速度在消灭着对人类有益的老物种。这一速度似乎和人类能力提高和人口增加速度相适应。据很不完全的统计，鸟类在1600~1800年间灭绝25种，1800~1950年间灭绝78种，现在每三年灭绝两种。其中包括19世纪初在北美大陆估计栖息达50亿只的旅鸽，因遭滥捕而消灭。这种旅鸽最后一只于1914年死于美国辛辛那提动物园。

自公元1600年以来，仅据已知的有100种哺乳动物灭绝，即使体型较大，种群数量也巨大的生物种也免不了灭顶之灾。北美草原曾生活过六千万头野牛的种群，最后一头于1894年也遭到射杀。

据估计，地球上生物有300万~1000万种以上。至今有案可查的仅150万种，经人类研究和被人类所利用的只是其中一小部分。在庞大的生物种系中，至少有一半以上生活在热带雨林中，据统计，现在每年在非洲雨林中还发现200多种新植物。由于人类的活动，地球上原始森林已由十九世纪的55亿公顷(1公顷=10000米²)减少到现在不足28亿公顷，每年减少面积约2千万公顷，其中1.1万公顷以上是热带雨林。无数的植物、软体动物、昆虫和各类生物在人类还没有鉴定它们之前就随着原始森林的砍伐、鱼类的滥捕、围湖填海及污染等诸因素而从地球上消失了。因人类的其它活动使多少已知或未知的浮游动植物、软体动物、昆虫、植物及微生物被消灭。有人估计，现在每天生物灭绝速度约为1~3

种。有人预言，如不采取措施，生物灭绝速度照此下去，到本世纪末，将有20%物种从地球上消失。依世界未来协会预测，到九十年代，动植物灭绝速度为每年1万种，每小时有一各灭绝。至于濒临绝境的物种更多。仅据前几年不完全统计，植物约有2.5万种以上，脊椎动物有1千多种。

就我国情况看，据考证，两周时代黄土高原约有森林4.8亿亩，（1亩=667平方米）覆盖率达53%。到本世纪四十年代末，森林面积仅0.3亿亩，覆盖率为3%。水土流失使黄土高原沟壑纵横。1977~1979年仅2~3年时间，青海省原有280万亩森林被毁一半，现覆盖率仅为0.34%。在海南岛，1956年天然林覆盖率为25.7%，1964年为18.7%，1981年为8.5%，郁闭度也大为减少，致使许多植物如子京、坡垒、加卜等濒于绝灭。而霉草、裸实已经绝迹。据估计，按现有林木消耗速度推算，三十年后，我国林木将采伐一空。由于我国物种普查鉴定工作起步较晚，仅据零星资料表明：麋鹿、野马、白臂叶猴、犀牛等灭绝只是早晚的事。其它的如野象、野驼、坡鹿、雪豹等几十种脊椎动物数量骤减，也濒临灭绝。正式列入我国濒临灭绝的物种为354种，一个亚种，二十一一个变种。当然，造成生物灭绝原因很多，除了少数系自然死亡之外，多数都与人类有关，下面是若干动物灭绝原因不完全统计表（见表7-1）。

我们已经知道，生物间息息相系。一个生物链即形成一系统。链条中某一个环节出了毛病就危及生物链中其他种，就会以新的生物链关系代替旧生物链关系。

（2）人类活动对无生命物质循环影响

碳循环的干扰：据1970年统计，世界上含碳有机化合物进入环境的数量为：天然气16亿吨，松节油1.7亿吨，润滑

表 7-1 动物灭绝原因大致统计

类群	导致灭绝或濒危的因素	导致灭绝占百分比	导致濒危、易危占百分比
兽类	猎捕(贸易, 狩猎)	23	29
	栖息地破坏	19	32
	外来种引入	20	17
	玩赏、动物园及研究用	0	2
	扑杀天敌控制	1	1
	自然因素	1	7
	未知因素	36	10
	偶然意外捕杀	0	2
鸟类	栖息地破坏	20	60
	外来种引入	22	12
	猎捕(贸易, 狩猎)	18	11
	玩赏、动物园用捕杀	1	9
	疾病	1	1
	污染及杀虫剂	0	1
	人为干扰	0	2
	意外被杀	1	1
爬行类	未知因素	37	3
	猎捕 主要为商业用	32	44
	外来种引入	42	24
	栖息地破坏	5	22
	玩赏, 动物园用捕杀	0	8
	偶然被杀(落入鱼网等)	0	1
	未知因素	21	1
两栖类	栖息地破坏	100	66
	活动范围受限	0	16
	外来种引入	0	9
	猎捕	0	5
	化学污染	0	4

油及工业油料200~500万吨，洗涤剂150万吨，溶剂1000万吨，农药100万吨，各类有机化学品2700万吨。至于石油、煤等开采的量值更大。到1979年，估计世界上年消耗石油31.5亿吨，煤炭27.4亿吨，天然气约 1410×10^9 米³，估计现在仅因矿物燃料燃烧每年进入大气的二氧化碳约200亿吨。据认为每年因人为原因加进大气的碳量在50亿吨以上。进入大气中的CO₂大约2/3为植物所吸收，而1/3仍停留在空气中。由于排放量的增加和森林面积显著下降，尤其是热带雨林显著减少，使大气中CO₂量值在不断增加。据测定，大气中二氧化碳平均浓度，每年约增加0.2%。图7-1是夏威夷蒙娜罗亚大气中二氧化碳变化近半世纪的观测值，我们看到大气中二氧化碳稳步增长，最高峰值已达340ppm。

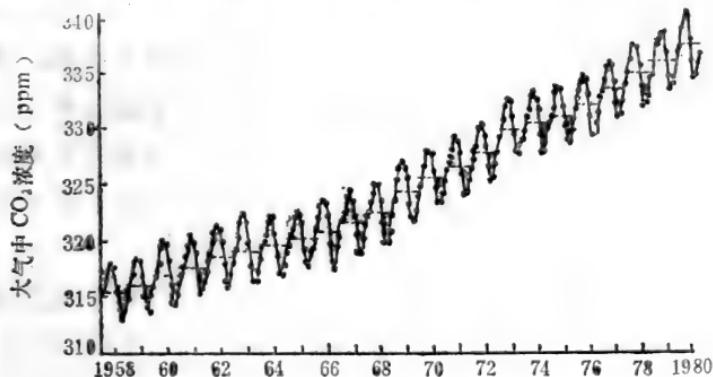


图7-1 夏威夷蒙娜罗亚大气中二氧化碳浓度的平均值

磷循环的破坏：人类无限制地开采磷矿使磷加快枯竭，美国内政部1972年曾发出警告说世界磷大约只能用100年，这可能是夸大的，但由于磷随水流沉积于大洋底部，难以返回大陆，所以磷循环是不完全循环。而生命物体却非磷不可，因而它的短缺危害性很大。另外磷的循环量增大也是某些水

域出现富营养化的原因。

硫循环的影响：工业化的进展，大量燃烧、开采含硫矿物质，使硫进入大气层和地表的数量有较大增加。仅据六十年代后期估计， SO_2 的年排放量已达 1.5×10^8 吨，约占地球上天然 SO_2 排放量的一半。此外还有大量的其它硫化物排进环境，参预循环。据卡力斯（Cullis）等（1979年）估计，人为排入大气的硫为 9.4×10^7 吨/年，占全球硫排放量的39.2%。酸雨的重要成分即是硫氧化物。

氮循环平衡的干扰：生物圈中分子态氮含量很高，但氮氧化合物含量很少。因人为活动，大量向环境中排放氮氧化物，使空气中氮氧化物显著增加，它是酸雨构成者之一。人为的活动使水质中含氮量显著增多，它与磷一起是某些水域富营养化的祸首。

水循环的变化：近代人类活动大量耗费地下水源，使地下水淡水量锐减，破坏了淡水贮存库。它在许多地区对人类威胁很突出，不少地区“水贵如油”。近20~30年内有些地区地下水位下降几十米，许多水源受不同程度污染，若不很好控制，人类的某些发展迟早将被水因子所限制。

除上述几点外，因人类活动，矿物质以前所未有的速度被开采、应用。例如世界上每年折合为80亿吨标准煤的矿物燃料被开采，每年地球上人为的金属开采量约为地质学上由地壳进入环境量值的10多倍。全世界每年至少有一千多万吨石油入海，汞入海量值也已达每年一万多吨。因大量铅溶物质流入海洋中，曾有人报导，太平洋表层铅浓度比1950年初约增加10多倍。核试验，原子科学实验，工业上应用和开采的放射性物质及其他污染物大量涌人物质循环，所有这些都将在不同程度上改变、影响着物质循环。

人类对物质循环的影响越来越被人类密切注意，七十年代初罗马俱乐部曾发出地球极限的信号。姑且不去讨论这类假设与结论是否成立，上述事实已表明人类确实对地球上的物质施加了严重的影响，如不采取措施迟早会发生灾难性的恶果。

2 人类活动对能量循环的影响

人类活动对能量循环的干扰、破坏，包括两方面：一是人类活动结果使地球接受外来太阳能能力受到干扰，另一个是人类活动对地球上生物能基础初级生产者的破坏。对于前者，限于技术水平，人类至今还未能精确勾画出其量值变化。然而历史上考证和几种现象足以引起人们的注意则是无疑的。而后者许多事实人们却不难见到。现分开讨论。

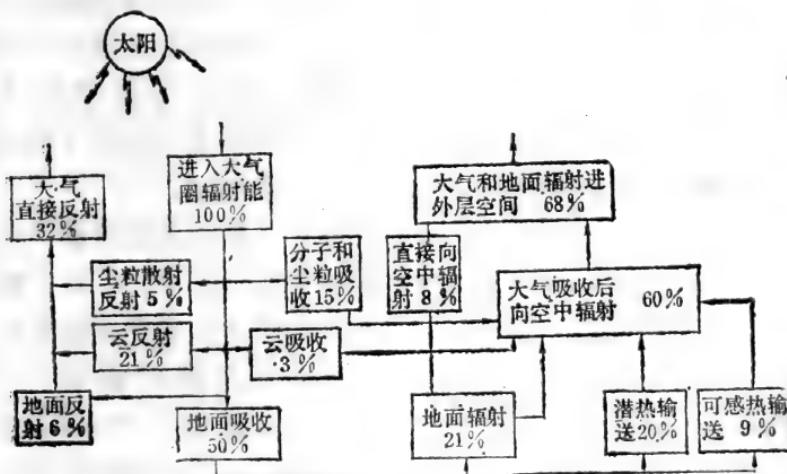


图7-2 地球辐射平衡示意图(图中大气层与地表间反复辐射没有给出。各人估计不同，仅供参考)。

(1) 人类活动对地球输入、输出能量交换可能施加的

影响

太阳辐射能到达地面必须途径大气层，大气层中臭氧、水蒸气、二氧化碳及其它气体与颗粒、灰尘等含量多少都直接影响到太阳能辐射到地面光波强度和地球辐射向宇宙间的长波强度。这些辐射数值变化如图7-2所示。如果我们把地球看作一个飞船，那么当时间以年、月、日计算时，可认为这飞船上除了能量外，其它物质变化如陨石的降落、宇宙射线的粒子落到地球上和地球向宇宙空间辐射粒子、离开地球的人造飞行体，天然微粒等同地球质量相比几乎可略而不计。由图7-2，我们知道地球几乎每时每刻都在与外界进行能量交流，但这种能量交流也会受到较严重干扰。据地质资料推测，地球上可能有过烟雾蔽天时代，那是因为某一天体撞击地球造成的，其结果初级生产者植物等因缺乏辐射能和适宜温度而死亡，造成地球生态系统剧变，使当时占统治地位的恐龙等动物因缺少食物等原因而灭亡。这些虽然是推测，但却指出了大气污染如何严重地影响地球上生态系统能量来源。那么人类活动又如何影响地球与外界能量交换呢？据测试，一些排放物能明显地对能量交换产生影响。

我们知道，近代人类活动使大气中二氧化碳和各种气体微粒以较快速度增加，无论是二氧化碳或是其它气体、微粒都会增加对太阳和地球的长波辐射的吸收。它们在吸收地球的红外辐射时，还把相当大的部分长波反射回地球。二氧化碳也吸收太阳的短波辐射。它们在地球与太阳间充当的角色如图7-3所描绘。地球上 CO_2 增加一倍将引起地球温度升高多少？估计为 $0.5\sim 3.5^\circ\text{C}$ 。另方面，空气中的小颗粒($0.1\sim 0.5\mu$)却能对太阳辐射短波起散射作用。据估计，大气中悬浮颗粒人为排放量已占世界总排放量的

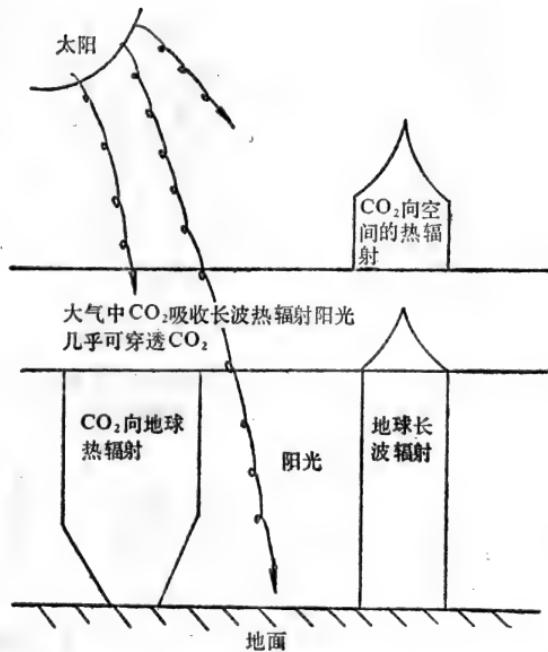


图7-3 二氧化碳起温室效应示意图

11.4%左右，但是在城市中，则主要是人为排放量。由于烟雾微粒和气体间相互作用使空气变得更为浑浊，光透性降低，辐射能减少。有报告指出，在一些大工业集中地区因烟雾不散使太阳光直接辐射到地面的量值较晴朗的日子少40%。在大气污染严重地区，雾茫茫，能见度极低，这已为常识。图7-4是日本大阪和东京所观察到的冬季雾日变化情况。根据美国1969年美教育、卫生、福利部提供的数据，美国华盛顿在六十年内其上空的大气浑浊度增加了57%，而瑞士的达沃斯城则增加了70%。分析这两地太阳辐射能量，比农村地区减少15~20%。布赖顿(Bryson)1971年曾指出，大气浑浊度如从37%增到38%，则温度大约降1.7℃。

二氧化碳的暖室效应和大气中小颗粒的阳伞效应最终将

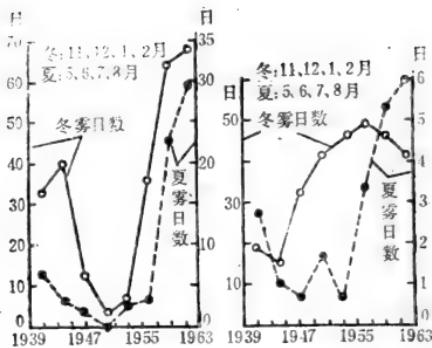


图7-4 日本大阪、东京的烟雾历年变化(馆稔等, 1972)

左: 大阪(大管浓烟雾); 右: 东京(东管浓烟雾)

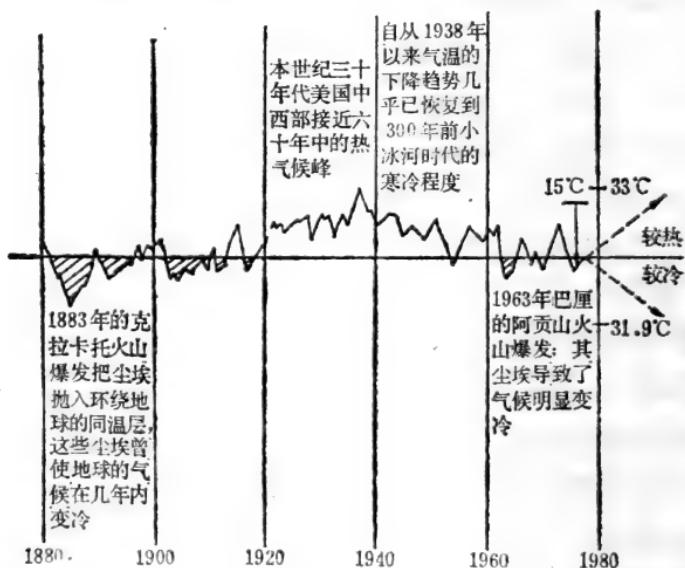


图7-5 北半球的温度变动

导致什么效果还无从知道, 但是图7-5及图7-6两个统计现象却说明了大气中阳伞效应与暖室效应的存在。当然, 其间也许是太阳黑子活动或其它因素起了作用, 现尚不得而知, 顺便指出, 近年资料显示, 大气中一些稀有气体, 如乙

烯、甲烷类碳氢化合物，它们较二氧化碳吸收太阳能能力大几十倍以至于成万倍。这些数量虽少，但“能量”大的人为的稀有气体在地球能量循环中将起多大作用，也越来越受到人们注意。不过，近年来全球气候越来越反复无常，许多气候变化乃是某些地区历史上极端情况。多数人认为这些变动与现代污染有关，关系多深，都是正在广泛深入研究的课题。

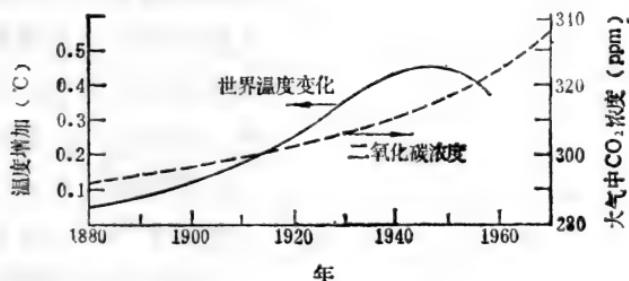


图7-6 世界年平均温度和大气中CO₂增加关系(Lovelock, 1971)

(2) 人类活动对生物链中能源流动的干预

人类活动对生物界另一能源变化的影响表现在对生物初级生产力的干预。我们知道，至今为止人类所使用的能源主要来自太阳，并且相当大的部分是间接使用和使用以前由生物固定的太阳能。地球绝大多数次级生产者是靠初级生产者供给能量，而初级生产者多是通过光合作用把太阳能以化学能形式储存起来。然而，现在人类大规模的砍伐热带雨林，污染大洋、湖泊、河流，草原沙漠化，把初级生产者：林木、浮游植物，藻类大批大批地毁于一旦。如以奥德姆(Odum)

(1970年)等估计海洋初级生产力、热带雨林和亚热带阔叶林、草原与牧场分别占全球的初级生产力的43.6%，29.0%，10.5%的话，那么就可以发现人类把海洋、湖泊、河流看做排污处。滥伐森林，糟蹋草原将带来怎样的恶果？这些行为

实际上是对地球上绝大多数次级生产者赖以生存的能量基础的破坏。例如，我们看到在正常的水域中，浮游生物组成较为稳定，当人类在某些水域中比较多地排放氮、磷等物质时，即出现富营养化情况，多种藻类的浮游生物被蓝藻、绿藻或红藻所代替，其它水生生物因缺氧或食物链破坏惨遭毁灭，这样，该水域中原生态系统遭到破坏，而代之以新生态系统。伴随这一过程输出、输入能量值，光合作用量自然也发生了变化。如 DDT 在环境中出现，它在水中含量的提高对海洋浮游生物光合作用有重大的影响，如图 7-7。显然，海洋中 DDT 含量提高，自然而然破坏了浮游生物的产量，从而对后面高营养级生物和生态系统产生一系列影响。其它的毒物、化学元素、重金属，化合物等污染同样会对初级生产力产生这样或那样的影响。因此，人类的一些活动实际上是对地球上许多次级生产者赖以生存的能量

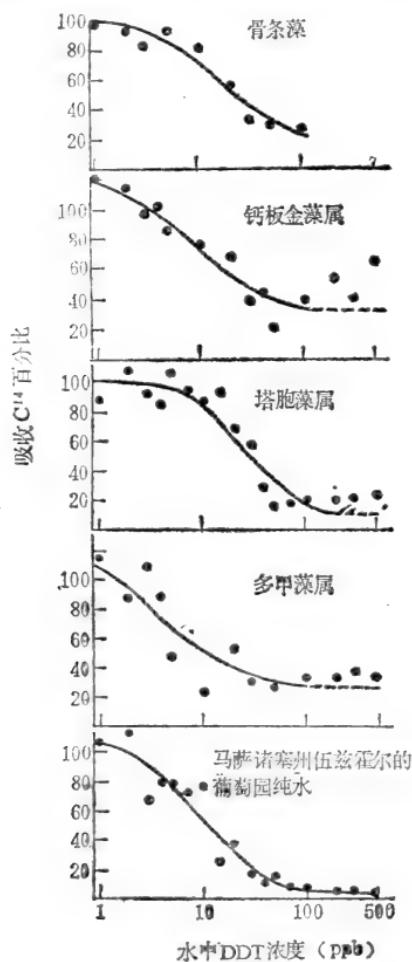


图 7-7 利用测定吸收同位素C¹⁴的相对量来确定不同浓度DDT对浮游植物光合作用影响(Wurster, 1968)

基础的破坏。还有，在过去若干亿年中被植物与各类生物所固着的能量，随着沧海桑田和地壳变迁转为各类化学能储存起来。现在，人类正以空前的速度开采利用。有人估算，现在植物所能固定的二氧化碳量不及世界二氧化碳的排放量的18%。顺倾指出，现在最理想的热机利用热能效率不超过30~40%，这就是说，在燃烧许多矿物原料的同时，还把约60%的余热排进周围环境，造成热污染。由上述诸点我们可以看到人类活动对生物链中能量基础——初级生产者的影响是相当广泛、深刻的。

3 人类活动、环境污染对生态系统的其它影响

(1) 毒物、污染物进入某一生态系后，原生态系中物种的种类、数量都将发生变化。一般耐毒、耐污种、适应新环境的种出现并发展，不耐毒、不耐污的种减少或消失。高等生物往往被低等生物所替代。

(2) 人类活动导致食物链发生变化，使各物种间比例在新的环境条件下达到新的平衡。

(3) 环境受污染后，通常是多数种数量减少，只是少数种或个别种数量增加。原来生物与环境中各物质关系发生变化，出现新的生物与环境间的物质关系。

(4) 物理污染、生物污染同样能对生态系统物质与能量的循环、种数、个体数、生物间关系产生不同程度的影响。例如热污染自然影响到生态系统中能量循环及生态系中各类生物。美国佛罗里达州迈阿密的比斯坎湾(Biscayne Bay)是一水深只1~2米的半封闭港湾，因受电站排出冷却水影响，结果在水温升高4℃以上的10~12公顷水面上，水生生物几乎绝迹，连绿、红、褐藻类也未幸免，只

有蓝绿藻存在。在水温升高 $3\sim4^{\circ}\text{C}$ 水中，水生生物种类、数量均减少。在水温升高不足 2°C 水域中，只是夏季动植物区系有较大变化。我们看到，热污染使湾内水生生物群落发生很大变化。

(5) 臭氧层的破坏对生态系统产生的影响。臭氧(O_3)，主要集中于离地面30公里的高空上，属平流层。它吸收紫外线辐射，使许多生物免遭过量的紫外线辐射而毙命或致病。但是，现有研究表明，人类作为冷冻剂和气溶胶驱散剂应用的氟氯烃11、12，多数都将进入平流层，导致臭氧层受破坏，使臭氧量值减少。据估计，如以现有速度使用氟氯烃11、12，平流层的臭氧将减少 $3\sim5\%$ ，届时将对生态系统中许多动植物产生影响。另方面，由于汽车尾气的作用，在对流层中将形成过量臭氧。当对流层中臭氧浓度达 $0.05\sim0.07\text{ppm}$ 时，将对许多植物造成伤害。据美国科学家近年测算，美国仅因汽车尾气造成的过量臭氧，每年使谷物损失达31亿美元。已发现，动植物状况要受平流层(上层)和对流层(下层)的臭氧浓度的严重影响。现在，人们开始重视平流层中臭氧减少和对流层中臭氧过度增加将对生态系统产生的严重影响。

最后，我们谈一个对生态系统正在发生着严重且明显威胁的环境污染物——酸雨。

早在本世纪五十年代初，瑞典和挪威发现湖泊中鱼类明显减少。到1959年，挪威渔场检查员Dannevig发现这是酸雨污染造成的。现在人们把pH值在5.6以下的雨水叫做酸雨，它的酸性主要来自大气中二氧化硫和氮氧化物。现在除了北美、欧洲近 $500\sim1000$ 万平方公里土地遭到不同程度的酸雨侵蚀外，在许多发展中国家也不同程度地存在。如我国四川

等地多次监测到酸度低于pH4的雨水。除了某些地区碱性土壤等环境因子对酸有较强中和能力，能使酸雨中氮和硫在一定浓度时可成为某些生态系统的养分外，酸雨对大多数地区的水生、陆生生态系及人类文明都带来不利影响。其表现：

1) 对水生生态系危害

酸雨使湖水、河水酸性提高，从而降低水中含钙率，损坏鱼骨骼并使之致畸；酸性水使湖泊、河底沉积物中有毒物质游离出来，如铅，镉等，从而使鱼类中毒或妨碍繁殖；pH较低的水域，浮游生物锐减，危及整个水生生物。据统计，因酸雨影响，挪威5000个湖泊中有1750个湖泊鱼类绝迹，900个湖泊严重影响；瑞典9万个湖泊中有2万个湖泊正在“死亡”。

2) 对陆地生态系统的危害

酸雨可使土壤中植物必需元素 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 等离子减少，使植物生长受阻。酸化严重的可使土壤中某些重金属加速迁移，从而对某些植物起致命的影响。酸雨损坏植物叶片，影响树木，作物的生长，有的则整个被毁坏。1984年欧洲共同体在一项报告中指出，西德全国750万公顷森林有1/3已遭酸雨破坏。在法国拉克区的小麦、葡萄等因酸雨污染使产量显著降低，致使农民可得到赔偿费。酸雨及大气污染对西欧、北美及世界上许多国家的森林、作物、动物及人都造成不利影响。

酸雨除上述对水生、陆生生态系有严重影响外，它还毁坏许多人类文明如文物建筑、交通设施等。例如由于重庆的雨水酸度比南京大，使重庆金属被腐蚀远比南京厉害。象南京电视塔、路灯、电线等更换周期较重庆长1—5倍。自然，也有人说它有好处，但现在基本确认酸雨的“过”远远大于

“功”，它是现代文明的副产品，是环境治理中的重点对象。

(二) 自然资源保护和环境改造

自然资源保护是指保护人类生息的自然环境和自然资源。自然资源乃是指在现有生产力发展水平和应用情况下，为满足人类生产、生活而被利用的自然物质和能量。环境改造系指人类采用措施使不利于人类生息的环境恢复和改造成有利于人类生息的环境，满足现代和将来人类物质文明发展的需要。这是个大题目，在这小节里我们偏重于在生物资源和生物环境改造方面介绍一些概念和情况。

当我们谈到自然保护和环境改造时，首先是指于人类有益否，是研究“人与环境”系统的。就环境来说，包括有机环境与无机环境。就资源来说，分为可更新资源（即可永续利用的资源，如空气、土地、太阳能、生物等）和不可更新资源（即储量有限、能被用光的资源，如多数矿物资源等）。无论是有机或无机环境，可更新和不可更新资源，它在人类还没有出世之前，绝大多数就已经存在于地球上，有的新种继续出现，人类就是诞生较晚的种。人类出现不久就表现出适应环境、改造环境的能力，但在漫长的人类婴儿、童年期，它对世界上许多东西是无知的，它把许多自然奥妙归结为鬼神的力量，这时的人类对自然影响可略而不计。随着人类社会的发展，人类对环境的影响、改造能力也逐步提高，以至于现在可对某些环境事件起决定性的作用。几万年前，人类主要活动只限于自然的采集、捕食，人类对环境的影响和资源的利用并不比某些哺乳动物大多少，那时的人

是靠天吃饭。与外界的物质、能量交换仅限于简单的生活资料上摄取和满足于生理上新陈代谢的需要。可认为这时人类并未对环境施加称得上改变环境的影响。几千年前，农业革命的到来使农业、畜牧业得到发展，这时人类不只仅仅适应环境，而是在局部地区对环境施加了影响，并且具有较大规模改变环境的能力。在许多文明古国发源地，象我国黄河流域、中东尼罗河流域、印度恒河流域的地形、地物、地貌都得到不同程度的开发，一些地区原始森林消失，村镇城市出现。但从总体看，这时人类对地球影响不大，只是部分地区问题。但在这部分地区某些庞大的动植物种群也难免深受其害或正在消灭。工业革命后，人类对自然影响的能力大为增强，就出现了能对地球物质循环，能量循环施加影响的人类活动，极大地改变着自然环境。人们追求美好、丰富的生活并获得成功和快乐，但也在不知不觉地为自己铸造灾难。一方面人们在努力克服自然环境给人类造成的不幸和灾难，减少自然环境的压力，例如风暴、旱涝灾害、地震等；另方面又由于人类的活动加强，助长了这些灾难并增添了原先自然环境中没有过的灾难。工业革命以前，人类向环境中排泄的排泄物有限，在一般情况下都能得到自然净化，地下矿藏开采也有限。工业革命后，情况完全改观。各种地上地下资源被人类大量开采、耗费，许多三废物质和自然界原先没有存在的物质被排放到环境中。自七十年代以来，在外层空间也增添了不少卫星、飞行物碎片和宇航员的废弃物。在人类活动中，人们越来越感到某些资源的短缺和环境污染严重威胁着人与生物圈，这就唤起人们对自然保护和环境改造的紧迫感。自然保护和环境改造目的乃是为了人类更好地生存，人们能合理地使用资源和改造被污染、被破坏了的环境，使之

对人类有益。保证生态系统，物质、能量循环得以正常进行，从而使人类经济和社会得以持续发展。为此，自然资源保护和环境改造应优先考虑：

1 保持基本的生态系统和生命维持系统

人类活动范围首先应保证生物圈中生态系统正常运转和对人类无害的生物的存活与延续得以维持。也就是说保护生命的存续过程和保证生命与环境间能量、物质交换得以正常进行的环境因子、物质基础。这就要求保护农业、水源、森林、海洋等生态系统基础。

至今，人类食物来源大部分是直接或间接地取自于土地，可在预见的若干世纪内，人类食物资源还主要是间接或直接地取自土地。而今土地资源已出现严重问题，大量良田沃土被用之建筑、交通；如果维持现在各国建筑、交通侵占耕地速度，再过20年全世界有 $1/3$ 耕地将消失。土地沙漠化，全世界现有35亿公顷土地有沙漠化危险。近半个世纪以来，我国已有5万平方公里土地沙漠化，正在演变为沙漠的土地约为现有沙漠面积的90%。水土流失严重，据测算，印度仅在80万平方公里土地上每年即流失土壤约600亿吨，随之失掉的养料大大超过施肥量。在我国，估计水土流失在50亿吨以上，其中氯、磷含量折算成肥料则等于我国化肥年产量。在我国可供垦殖的农业用地仅约1亿多亩，保护土地资源在我国已是当务之急。就世界范围看，尽管耕地还可能翻翻，但这样做的结果同时毁坏相当数量的森林、草原等用地，而引起一连串生态反应，所以维持人类生存的农业生态系统中土壤污染已成严重问题。怎样保护土壤免受污染，随着工业化的进展越来越显得重要。有关森林资源、淡水资源的保护和开发利用

在世界上是个突出问题，在我国更显突出。我国森林、淡水资源人均占有量在世界各国也是列在后几名中，因此，保护森林、节约用水、植树造林、废水净化回收已是刻不容缓。当今，海洋为许多工业废水废物藏污之地，使水产资源遭到不同程度的破坏，各国近海水产资源明显下降。照此对海洋倾倒污物速度，远洋捕捞受到较为严重威胁也非遥遥无期之事，特别是随着海洋矿物资源的开发，保护海洋自然资源将成为很突出议题。大气则是每个需氧生物所离不开的，它受到现代文明之害最深。各种废气进入大气不但毒害人类和各种生物，而且毁灭许多陆生、水生生物。硫氧化物，氮氧化物形成的酸雨已正在毁坏人类的许多文明古迹。上述情况说明，环境保护和环境改造已成为现代人类文明活动的重要组成部分，这是保护人类基本生态系统和维持生命系统正常进行并得以延续所必须的。

2 保存物种遗传的多样性

生物品种的改良，生物遗传工程的进展主要靠的是不同物种品系中遗传基因的重新组合。据不完全的统计，许多增产的主要农作物，有 $1/3$ 以上是利用野生植物的品种培育出来的。就现状看，品种筛选的结果，在近代农牧渔业上作为优良品系被推广的良种只是有数的若干种。这若干种在现代农牧渔业中遗传基础十分狭窄，许多优良种在农业生产上占绝对优势。例如加拿大麦田一半以上种的是尼帕尔瓦（Neep-uwa）种，巴西的咖啡树几乎是从同一棵咖啡树上遗传下来的。这说明，如果我们不尽量保留各类生物种，那么留传给我们后代的遗传物质就微乎其微。想通过各种改良措施和遗传工程手段而获得在将来环境条件下高产、高质的品种，和

提高品种在将来环境中抗病虫害的能力，以及培育某些特殊生物就极其有限，甚至是不可能的。而众多的生物种群所含有的各种不同营养物和物质更是中医药的宝库。据估计，美国的药品中有40%以上是天然生产的药材或以其作为主要成分。这些药材有25%来自高等植物，13%来自微生物，8%来自动物。现已发现，有许多物种原先认为用处不大或是研究价值没有被发现，随着科技进步而显出它们特殊的用处。如犰狳是一种与麻风病有关的动物，是治疗麻风病的宝贵材料，在过去却是列为无益之物。北极熊作为高效能吸热器来研究也只是近世之事，仿北极熊的某些机能制造出新的防冻衣和高效能集热器。因此保护物种，保护遗传多样性对农、林、牧、渔各业及卫生、仿生学等科学的发展很有必要。自觉保护各类生物种，使生物保持生态过程相对稳定性，生态遗传的连续性乃是现代人类重要任务之一。

对于矿物资源更明显。许多矿物资源随着文明进展被开发，被广泛应用。许多原先认为无用的稀土元素等，随着宇航事业，各种工业、无线电技术发展而被开发。煤、石油原来用做照明、燃烧取热之用。现在各类化工企业合成产品均离不开它们，由此我们不难明白保护各类矿物资源的重要性和长期性。

因人类活动使许多物种灭绝或濒临灭绝，有的是人类有意捕杀所致，有的是因栖息地破坏或新种入侵，以及各类环境污染因素的影响，更多的是各类条件综合所造成。因此在环境改造中，尽量为某些濒临灭亡的物种创造生态条件，杜绝人为的捕杀，改造被污染了的栖息地，净化污染源，减少或消灭污染物对栖息地的再侵蚀，建立生物物种保护地等应是主要一环。一句话，在多变和科技迅速进展的年代中，保存

物种遗传多样性是目前重要的课题，这就要求有效地制定出确立物种保护地和改造被污染环境的有力措施。

3 保证物种和生态系统的永续利用

“竭泽而渔”和“杀鸡取卵”这两句成语充分剖析了一些目光短浅的人对有限资源的巧取豪夺。相反“留得青山在，不怕没柴烧”则是形容那些有远见的人对自然资源的合理开发，从而取得永续利用。

随着人口的增加，生活水平的提高，技术的进步，人类对各种资源需求越来越广，越来越大。为此就必须保护、管理、开发好各类生物资源和矿物资源，特别是可再生资源。务必让它子孙繁衍，使人类世世代代能得到享用。许多动物的灭绝是因某些人的贪得无厌；如味美的旅鸽，北美的野牛等都成为人类历史中的生物。人类若不进行自我约束、鲸鱼、海牛、大象也正在一步步走向灭绝的境地。所以对生物物种生息、繁殖有巨大意义的场所——环境应尽快予以管理和改造，使物种得以不断繁衍。海洋为人类提供蛋白质约6%，但因人类滥捕和环境污染，使生态环境遭到破坏，全世界已有近25个渔场临近枯竭，许多地区鱼的捕获量显著降低。例如我国黄鱼产量大幅度下降，不及解放初期的40~50%。世界上海龟等海产品均告急。因此当前禁止滥捕，合理开发和减少海洋、河流、湖泊污染仍是保证水生生物永续利用的关键。森林为工农业、人类生活提供了丰富的产品，也是保持地球生态平衡的支柱。人类的许多工农业产品，生活用品的短缺，生态环境的恶化都直接或间接地与世界上林地减少，尤其是热带雨林减少有关。森林是许多动植物群落的重要分布区。森林遭灾使依赖其生存的许多动植物也就随

之消失。牧地以保护土壤、牧草的繁茂为紧迫任务。全世界约有30亿牲畜，大部分牧草是由牧地提供的。为了保证牧地的永续利用，必须用科学方法管理牧草及牲畜。过度放牧和对草地不加保护，恶化草原的作法只能招得子孙后代的唾骂。野生动植物资源是许多国家重要的经济来源，是旅游、围猎、娱乐的重要场所。但许多野生动植物已经消失。我们的后代只能在书本、标本室、录像带上去认识，有的则连现有人类还未清楚的情况下就消失了。

许多不可更新的矿物资源，人类使用时应慎之又慎。为了尽量延长它们的使用寿命。人类使用时首先是节流，其次还应开源。这里开源有三种意思。1.发现新代用品，留做后备。2.回收废物，废物利用。3.努力寻找新矿藏以及用人工合成，特别是用可更新资源合成之，使之世世代代能永续利用。这一点主要靠人类文明进步程度。

需要指出，我们说的并非是不开发，而是合理开发，是在争取能得到永续利用的基础上开发，不但使我们享用了这些资源，也使我们子孙万代能享用之。究竟怎样才能做到合理科学地开发各种资源，这是个大课题，属环境保护经济学或生态经济学研究的范围。我们不去谈它。我们只是指出应在保证各物种和生态系统永续利用基础上制定出有规划地，合理地保护、改造、管理、开发好土地、森林、海洋、野生动植物、矿物等资源。在追求人类美好的、丰富的生活时，多多思考我们后代的需要。

4 环境改造

环境改造除了对土地、水域，大气等受污染场所进行治理外，还应包括保护地的设置，以挽救濒于灭绝的物种，环

境的生物、物理、化学治理等。当然应包括污染源发生地三废的控制、管理、净化。通常，如果控制了污染区的污染来源，环境改造就可算完成一大半。对无污染源的污染区和不再进行损坏的环境，经过一段时间人工治理和自然净化，一般都可得到较好的改造效果。例如，曾是出名重污染区的泰晤士河，经过治理后，近150年时间中没有见过的鲑鱼，1984年又出现了。在环境污染治理改造中生物治理往往占有特殊位置。这是因为治理的最后结果乃是恢复出现较为理想的生态环境、合适的生物群落，而生物治理恰恰创造了这一条件。科学技术的发展使人类对其周围环境不断地进行改造、调整、赋以新的内容，以适应人类需求。

(三) 环境生物学的发展趋势

应当指出，当良性循环的生态环境被破坏后，少则几年，多则几十年，甚至几百年才能恢复到良性循环状况，有的甚至永远恢复不到原生态环境。因此，凡事均应衡量利弊，绝不能顾此失彼。在可预见几十年中，环境生物学应优先密切注意哪些变化？它的发展又是如何？

首先，人类应注意大气质量变化，因为地球与外界能量交换必经大气层，它对好气生物的生命活动生死攸关，地表各类生物在生命活动中都需与之气体交换。人们除了应密切监视大气中的硫氧化物、氮氧化物、碳氧化物量值变化外，特别应注意在大气中新添的污染物与稀少气体变化。例如太空垃圾，现在还是少数个卫星，飞船在天上转，几十年后可能将是无数个了。到那时，太空污染绝不仅象今天只限在大气层中讨论，而是在同温层，电离层上议论了。诸如臭氧层

的破坏必将对人类文明进步带来副作用。对地球上许多生物带来不利影响。科技越进步，人类对太空开发越广阔，可以肯定地说对地球上诸生物越会带来影响。它的影响多深、多大没有经过将来生活的人是回答不出来，只能由未来人们来做答案。

其次，海洋面积占全球面积71%。在人类活动中，它提供的鱼类占世界动物蛋白供给的16%。它是地球上二氧化碳主要贮存库。海洋对全球气候变化起着重要支配作用。人们还利用海浪、潮汐发电获得重要的可更新能源。在洋底，埋藏着无数的矿物资源。它还蕴藏着极丰富的生物资源。近几十年内，人们将向海洋要各种各样的物质，从生物到非生物。至今为止人类向海洋要的物质主要是生物性的。还有是近几年开发的近海油田，向海底要油，将来是要各种各样矿物。此外人类还把海洋做为藏污纳垢之地，人类活动各类废物大约有60%以上倾倒人大洋，大洋被人们认为是最好的废物处理地。可以想像，当人类向海洋开发各类矿物资源时几乎可以肯定要破坏许多海洋生物的生态环境。首先是提供全球 $\frac{1}{2}$ — $\frac{1}{3}$ 氧气制造任务的许多浮游植物要遭殃，由此可以很快危及次级生产者。据估计，如果合理的利用海洋，海洋每年可向人类提供三十亿吨鱼、贝类，而今被利用的鱼、贝类仅仅一亿吨。当人类把相当大部分生产，采矿的废弃物放到海洋时，它为人类提供的水产品是增加还是减少？从目前情况看，尽管鱼类捕捞更科学化，技术水平提高了，但资源却日益减少，鱼类捕捞量在许多国家已呈下降趋势，如果人类在开发海洋同时不恢复海洋的生态环境，海洋生物由种数到个体数必将进一步恶化。值得指出的是，人们现在过高地估计了海洋纳污能力，但很少注意到当海洋也象某些湖泊受污染

而变成死海时，它何时才能恢复的问题。须知，海洋是没有出口的，它不象受污染的河流、湖泊可把污水排进大洋再由雨水补充，较快地达到自然净化。这不是杞人忧天，当人类大规模地开发海底矿物时，这一问题就变成现实了，当地球上海水被搅浑时，人们将怎么办？

第三，我们脚踏的土地。对比大气和海洋的变化，陆地的变化更为复杂、严重和现实。除南极洲外，全球陆地面积约为1.35亿平方公里，其间为人类提供食物和栖息地的只是其中一小部分。这部分土地主要是农田、草原和林地。据估计，适于粮食生产的优质和中等的农田约1800万平方公里，约占土地总面积的13.4%。根据一些人估算，近年来每年农田平均损失如下：因水土流失毁坏2万平方公里，毒化损失2万平方公里，沙漠化损失2万平方公里，非农业用途用去8万平方公里。土壤流失本是自然现象，但因现代人类活动这种自然损失加快了2.5倍。有人悲观地估计如以现有水土流失速度计，不用几代人，许多土地将变成为不可更新资源。由于年平均土地损失量达15万平方公里，人们就转而向牧场、森林要农田，其结果必将造成更为严重的水土流失和沙漠化，加速了土地的恶化。目前，全世界受沙漠化威胁的有灌溉用地27万平方公里，放牧地3000万平方公里，靠天灌溉农田173万平方公里，现在每年沙漠化土地约6万平方公里。由于过度放牧，牧场大面积退化，毁林垦荒，滥砍滥伐和薪炭的需要使现在开阔林和封闭林每年约以38万平方公里和75万平方公里速度消失。所有这些变化，据估计，在近几十年内都将继续并更加恶化，它将对人类和地球生物物种产生怎样的影响还无从清楚。但几乎可以肯定地说，农田、森林、牧场的大规模减少，沙漠化的扩大必将对地球气候、碳循环、遗

传物种、粮食生产等带来不利影响。还应提到的是随着社会发展，人口增加等原因许多生物生存所必需的淡水资源必将越来越紧张，人类如不能有效、合理地利用淡水资源和开发深层地下水，水做为限制因子将非常显著地排在各类生物和人类社会面前。

最后，在将来人类新的文明文化中，陆地生物种群格局又将是如何呢？遗传工程发展促使新种的增进，而旧的生物又将遭到什么待遇？新的工业技术和膨胀的人口必带来新的污染和土地、河流等问题。所有这些诸多因素的交叉必导致许多生态因子变化，因而必将出现新的生态平衡。这种平衡将显示出人类社会处理生物圈、技术圈（指人类在生物空间中建立的人造结构系统：如城市、乡村居住区，工农业，交通、生产技术等等。）和社会圈（指人类建立的非结构性人造系统，它处理社会内部的关系和与另两个系统的关系）间平衡的能力。

在可预见的20~30年内，人类对环境生物关系基本上是力争保持地球上已有生物的绵延不断，力争保持优良生态环境的连续性。对各类环境污染，尽可能寻找无副作用的物理、化学、生物降解或消除污染方法，利用各种环境因子和各类生物遗传工程技术培养符合于人类需要的生物种群。人类也将力争在较短时间内使用无污染或少污染环境的技术。例如在能源上可能更多地应用太阳能、氢燃料、化学合成燃料等。应用无污染环境或少污染环境的防治生物病虫害手段等。将相当注重研究因人为污染而引起的区域和全球性的环境变化以及它对生物圈生物资源的影响。用生物学方法治理环境污染中主要发展方向是用生物工程方法培养具有多功能高降解能力的生物或是用酶固定化技术制备若干功能催化剂。

来降解污染物并继续寻找自然中存在的降解、防治污染的生物种群。进一步强化生物净化、生物降解方面的研究，建立完善的污染物效益数据和生物样品库。在环境生物学的研究方法上更多的是用整体观念和系统方法来研究，更多的是定性定量分析、研究各种环境同生物间关系，尤其是研究已发现和未发现的人为环境污染物对各类生物、生态系统影响。采用计算机模拟与实验室实验、生产实践相结合的方法进行研究、建立环境生物关系模型，尤其是污染物对生物作用模型，借以预测，预报在特定环境条件下（如栖息地受破坏，人为环境污染等）生态系统的文化和稳定性，从而为种群，群落结构、生态系统中能量，物质交换制定最优化规划提供依据。未来的环境生物学将比现在更多的深入生物机制、细胞、基因与环境因子变动关系的研究。将是不仅从宏观角度研究生物与环境间物质、能量间交换，例如，森林、草原、湖泊等陆生、水生生态系之间和内部的相互关系的调节、控制和平衡关系，而且相当注重研究微观世界中物质、能量的交换；加强污染物对生物的致病机理与因环境因素引起的突变性的生物学基础的研究；揭示出至今未为人们所知的环境与生物间的微妙关系。

环境生物学做为既古老而又年轻的学科在将来历史发展中将日益显出其重要性。这是因为人也是生物，人类许多活动是围绕着人与环境间关系而开展。人类活动中各种物质流，能量流无不是在环境与生物间开展，此中微妙关系由于过去科技水平限制，人们只是知其大概，许多细致处人们并不了解，甚至是无知的。可以说环境生物学中绝大多数机制人类是不清楚的，这正是未来的人们所应开发的地方。

中科院植物所图书馆



S0017470

86年10月13日

209.64(476.)

总号	13371	书号	58.181 335	532
书名	环境生物学			10.13
著者				
出版处				

阅 者 借书证号 还书日期

13371

统一书号：13239·0930

定 价： 1.60 元